



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

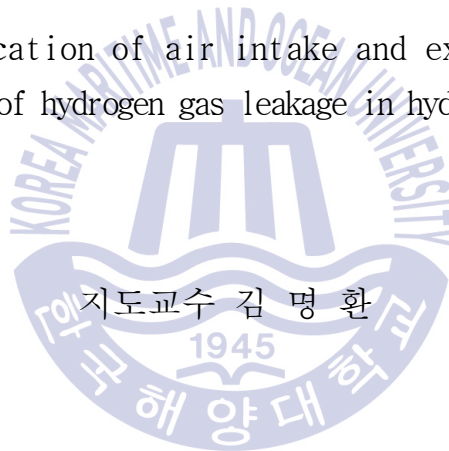
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

수소 탱크 저장실 내 누출 수소가스의 효과적 배출을 위한 급·배기구 위치 선정에 관한 수치해석 연구

Numerical study on the location of air intake and exhaust outlet for effective
ventilation in case of hydrogen gas leakage in hydrogen tank storeroom



지도교수 김 명 환

2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

황 대 중

본 논문을 황대중의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 박상균



위 원 : 김명환



위 원 : 길병래



2017 년 12 월 14 일

한국해양대학교 일반대학원

목 차

List of Tables	III
List of Figures	V
Abstract	VIII

1. 서 론

1.1. 연구 배경	1
1.2. 연구 목적	7

2. 수소탱크 저장실의 모델링 및 수치해석

2.1. 수소탱크 저장실 형상과 관련규정	10
2.2. 수소탱크의 형상	13
2.3. 수소탱크 저장실의 형상	14
2.4. 수소가스 누출 해석	15
2.4.1. 종래의 연구	15
2.4.2. 수소탱크의 균열 상태에 따른 수소누출	17
2.4.3. 모델링에 적용되는 수소누출 조건	19
2.5. 수치해석	25
2.5.1. 지배방정식	25
2.5.2. 난류모델링	27
2.5.3. 화학종 수송 방정식	28
2.6. 수소 누출에 관한 CFD 적합성 검증	29
2.7. 수소탱크 저장실 모델링의 경계조건	31
2.8. 격자수 의존성 검토	34

3. 해석 결과

3.1. 통풍용량에 따른 결과	36
3.1.1. 통풍용량에 따른 수소농도	36

3.1.2. 통풍용량에 따른 속도분포	39
3.2. 배기구 위치 및 크기 변화에 따른 결과	41
3.2.1. 배기구 높이에 따른 수소농도	43
3.2.2. 배기구의 설치 측벽에 따른 수소농도	47
3.2.3. 배기구의 설치 측벽에 따른 속도분포	49
3.2.4. 탱크의 영향이 작은 경우, 배기구의 설치 측벽에 따른 수소농도	52
3.2.5. 천장 배기구 위치에 따른 수소농도	56
3.2.6. 멀티 배기구에 따른 수소농도	60
3.2.7. 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 수소농도	62
3.3. 급기구 위치 및 크기 변화에 따른 결과	65
3.3.1. 급기구 높이에 따른 수소농도	65
3.3.2. 급기구 높이에 따른 압력분포	68
3.3.3. 급기구 크기에 따른 수소농도	72
3.3.4. 급기구 크기에 따른 압력분포	79
3.3.5. 급기구의 설치 측벽에 따른 수소농도	81
3.4. 수소탱크 저장실의 기울기에 따른 결과	84

4. 결 론

List of Tables

Table 1 Tier III Regulation	1
Table 2 Main contents of SEEMP	2
Table 3 Specification of hydrogen	4
Table 4 Features according to hydrogen storage methods	8
Table 5 Regulations on arrangement and system configuration of fuel cell	11
Table 6 Regulations on ventilation systems	12
Table 7 Regulations on hydrogen gas detection	12
Table 8 Specification of high-pressure hydrogen gas tank	13
Table 9 Types of high-pressure hydrogen gas tank	17
Table 10 Calculation conditions of CFD modeling	32
Table 11 Ventilation capacity according to outlet velocity	36
Table 12 Hydrogen molar fraction(Vent-1~10) according to leakage and ventilation position	42
Table 13 Average velocity(Vent-2, 3, 7, 8) according to leakage and ventilation position	50
Table 14 Hydrogen molar fraction(Vent-3, 7) according to leakage and ventilation position	53
Table 15 Hydrogen molar fraction(Vent-4, 5, 6) according to leakage and ventilation position except for top direction leakage of tank ..	58
Table 16 Hydrogen molar fraction(Vent-3, 7, 10) according to leakage and ventilation position expect for top direction leakage	62
Table 17 Hydrogen molar fraction(Intake-1, 2, 3) according to leakage and ventilation position	65
Table 18 Hydrogen molar fraction(Intake-1, 4, 5) according to leakage and ventilation position	73
Table 19 Average velocity(Intake-1~5) according to leakage point and	

ventilation position	74
Table 20 Hydrogen molar fraction(Intake-1, 6) according to leakage and ventilation position	81
Table 21 Hydrogen molar fraction(Gradient-0°~5°) according to leakage and ventilation position	85



List of Figures

Fig. 1 선박에 적용되는 친환경 동력원의 예	3
Fig. 2 수소에너지를 이용한 연료전지자동차	4
Fig. 3 힌덴부르크호 대참사	5
Fig. 4 밀폐 공간의 수소가스 폭발사고 (2010년, 전라북도 군산)	6
Fig. 5 연료전지의 기본원리	7
Fig. 6 소형선박에 적용 가능한 수소탱크 저장실의 배치	9
Fig. 7 고압 수소탱크의 실물과 3D 형상	13
Fig. 8 수소탱크 저장실 3D 형상	14
Fig. 9 탱크의 균열 상태에 따른 수소누출	18
Fig. 10 Han, et al. (2014)의 고압수소 분출 실험 모식도	20
Fig. 11 Han, et al. (2014)의 고압수소 분출 실험결과	20
Fig. 12 밀도 프라우드 수에 따른 부력과 운동량의 영향	22
Fig. 13 Schefer, et al. (2007)의 수소 누출 실험 모식도	23
Fig. 14 밀도 프라우드 수에 따른 수소 분출 형상	24
Fig. 15 CFD 적합성 검증을 위한 모델링	29
Fig. 16 실험과 CFD Modeling의 결과 비교	30
Fig. 17 임의의 수소가스 누출위치	32
Fig. 18 급배기구 위치 설정	33
Fig. 19 격자수에 따른 저장실 내의 평균속도	34
Fig. 20 CFD Modeling의 mesh 단면	35
Fig. 21 통풍용량에 따른 저장실 내의 수소 평균 물분을	37
Fig. 22 통풍용량에 따른 저장실 내의 누출수소 농도분포	38
Fig. 23 통풍용량에 따른 저장실 수직단면의 속도분포	40
Fig. 24 고정된 급기구 조건에서 배기구의 위치 변화	41
Fig. 25 배기구 높이에 따른 평균 수소물분율과 표준편차	44
Fig. 26 배기구 높이에 따른 수소 농도분포와 유선도	46
Fig. 27 설치 측벽에 따른 배기구의 배치	47

Fig. 28 배기구 설치 측벽에 따른 평균 수소몰분율과 표준편차	48
Fig. 29 배기구 설치 측벽에 따른 수직단면의 속도분포	51
Fig. 30 탱크의 영향이 대단히 작은 저장실의 3D 형상	52
Fig. 31 탱크의 영향이 작은 경우 수직단면에서 수소 농도분포	54
Fig. 32 탱크의 영향이 작은 경우 수직단면에서 수소 속도분포	55
Fig. 33 천장면의 위치에 따른 배기구 배치	56
Fig. 34 천장면 배기구 위치에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차	57
Fig. 35 탱크 Top의 수소누출과 Vent-5의 조건에서 수소농도 분포	57
Fig. 36 탱크 Top 방향의 누출을 제외한 천장면 배기구 위치에 따른 수소 평균 몰분율과 표준편차	59
Fig. 37 천장면에 2개소 분할 배치된 멀티 배기구	60
Fig. 38 멀티 배기구 조건에서 누출 영역에 따른 수소 평균몰분율	61
Fig. 39 멀티 배기구 조건에서 누출수소의 농도분포	61
Fig. 40 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 비교	62
Fig. 41 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차	63
Fig. 42 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 누출수소의 유선도	64
Fig. 43 급기구 높이에 따른 배치	65
Fig. 44 급기구 높이에 따른 평균 수소몰분율과 표준편차	66
Fig. 45 급기구 높이에 따른 수직단면의 수소농도 분포	67
Fig. 46 급기구 높이에 따른 수직단면의 속도분포	69
Fig. 47 급기구 높이에 따른 측벽의 압력분포	70
Fig. 48 급기구 높이에 따른 저장실 수평단면의 압력분포	71
Fig. 49 급기구 크기 증가에 따른 배치	72
Fig. 50 급기구 크기에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차	73
Fig. 51 급기구 높이와 크기에 따른 저장실 내의 평균속도	74
Fig. 52 급기구 크기에 따른 수평단면의 속도분포	76
Fig. 53 급기구 크기에 따른 수직단면의 속도분포	77
Fig. 54 급기구 크기변화에서 저장실 내 높이에 따른 속도분포	78
Fig. 55 급기구 크기에 따른 바닥면의 수소 가연영역 분포	78
Fig. 56 급기구 크기에 따른 저장실 수평단면의 압력분포	79

Fig. 57 급기구 크기에 따른 측벽의 압력분포	80
Fig. 58 급기구 설치 측벽에 따른 배치	81
Fig. 59 급기구 설치 측벽에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차	82
Fig. 60 급기구 설치 측벽에 따른 누출수소의 유선도	83
Fig. 61 수소탱크 저장실의 기울기에 따른 배치	84
Fig. 62 수소탱크 저장실 기울기에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차	85
Fig. 63 탱크 Top누출조건에서 시간 경과에 따른 저장실 내 수소평균몰분율 ..	86
Fig. 64 수소탱크 저장실 기울기에 따른 수직단면의 수소농도 분포	87



<국문초록>

수소 탱크 저장실 내 누출 수소가스의 효과적 배출을 위한 급·배기구 위치 선정에 관한 수치해석 연구

Hwang, Dae Jung

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

수소에너지는 대기 오염과 화석 에너지의 고갈에 따른 문제를 해결할 수 있는 친환경에너지로 주목을 받고 있다. 따라서 많은 분야에서 수소에너지를 동력원으로 활용하는 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서는 수소에너지를 이용한 연료전지시스템을 소형선박에 적용하는 것에 주안점을 두었다. 수소는 지구상에서 가장 가벼운 분자로서 공기와 넓은 범위에서 가연성 혼합 가스로 형성될 수 있으며 발화에너지가 매우 작기 때문에 작은 불꽃에 의해서도 아주 쉽게 점화 될 수 있다. 또한 소형 선박은 특성상 육지에 고정되는 않고 기상상태에 의해 가혹한 운전 조건이 형성되기 때문에 수소에너지를 이용하는 소형 선박은 수소저장에 대한 안정성이 우선적으로 담보되어야만 한다. 본 연구에서는 수소저장에 대한 안정성 평가의 일환으로 상용화된 자동차용 고압 수소탱크를 소형선박에 적용하는 것을 가정하여 한국선급의 “선박용 연료전지 시스템 지침(2015)”의 규정에 의거한 수소탱크 저장실을 모델링하였다. 가로 0.85m, 세로 1.4m, 높이 0.85m의 단순한 형태의 수소탱크 저장실을 만들고 내부의 중앙에 700 bar 고압 수소탱크의 형상을 만들어

배치하였다. 수소탱크의 앞, 뒤, 위, 아래, 측면 5 곳의 영역에 임의의 수소누출 위치를 설정하고 저장실의 외벽에는 가로 0.15m, 세로 0.15m 구획을 나누어 연구자의 의도에 따라 급기구와 배기구의 위치 설정이 가능하도록 하였다. ANSYS사에서 제공하는 CFX(v. 17.1)를 이용하여 통풍용량, 배기구 위치 및 급기구의 위치를 변경하면서 3차원 전산 해석을 수행하였다.

그 결과, 통풍용량의 증가에 따라 누출수소의 배출 성능은 증가하였으나 그 관계가 선형적이지 않지 때문에 통풍장치에 소모동력을 고려하여 적절한 통풍용량이 선정되어야 함을 알았다. 그리고 배기구의 높이를 저장실의 하부 측보다 상부측에 배치하는 것이 수소가스의 가벼운 특성을 고려할 때 더욱 효과적으로 누출수소를 배출하는 하는 것을 확인했다. 또한 급기구의 위치는 상부측보다 하부측에 위치하여 유입공기의 흐름을 따라 누출수소가 함께 배기구로 배출 될 때 효과적으로 환기되는 것을 확인했으며 운항 중에 소형선박의 Trim을 고려하여 수소탱크 저장실의 기울기 변화에 따른 계산을 진행하였다. 이를 통해 기울기가 증가함에 따라 누출수소의 배출이 효과적이고 안정적임을 확인하였다.

KEY WORDS: CFD 전산유체역학; Hydrogen leakage 수소누출; Ventilation 환기; Hydrogen tank 수소탱크; Air-supply and Exhaust 급배기.

<영문초록>

Numerical study on the location of air intake and exhaust outlet for effective ventilation in case of hydrogen gas leakage in hydrogen tank storeroom

Hwang, Dae Jung

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Hydrogen energy is attracting attention as an eco-friendly energy that can solve the problems caused by air pollution and depletion of fossil energy. For this reason, research is underway to use hydrogen energy as a power source in many fields. This study focuses on the application of hydrogen energy to small ships. Hydrogen is the lightest element and can produce a wide range of flammable gases with air or oxygen. And since the ignition energy is very small, it can be easily ignited by a small flame. In addition, small vessels are not fixed on land due to their characteristics, and the stability of the vessels is more important because severe operating conditions are formed by the weather conditions. Therefore, considering the characteristics of hydrogen and the operating conditions of a ship, applying hydrogen energy to a small ship requires safety evaluation in many areas.

As a part of the evaluation of the stability of hydrogen in this study, the hydrogen tank storage room was modeled according to the provisions of the "Marine Fuel Cell System Guideline" provided by the Korean Register of Shipping. A rectangular chamber of 0.85 m width, 1.4 m height and 0.85 m height was simplified, and a high-pressure hydrogen tank of 700 bar was formed at the center of the tank. Hydrogen leaking points were designated in the front, Rear, top, bottom, and side of the hydrogen tank, and 0.15m in width and 0.15m in height, respectively, so that the position of the air supply mechanism and the exhaust port can be set according to the intention of the researcher. Using ANSYS CFX provided by ANSYS, computer analysis was carried out while changing the ventilation capacity, exhaust port position, and position of the air supply mechanism.

It was confirmed that the release of hydrogen was effective in increasing the discharge capacity of the hydrogen as the ventilation capacity increased and that the position of the exhaust port was located at the upper side of the lower side of the storage chamber. It is also found that the position of the air supply mechanism is located at the lower side than the upper side, and the leakage hydrogen is efficiently ventilated along with the flow of the incoming air when exhausted to the exhaust port. During the operation, analysis was performed according to the slope change of the rectangular tank storage room considering the trimming of the small vessel. As the slope increases, it was confirmed that the release of hydrogen was effective and stable.

KEY WORDS: CFD; Hydrogen leakage; Ventilation; Hydrogen tank; Air-supply and Exhaust.

1. 서 론

1.1. 연구 배경

전 세계적으로 대두되고 있는 환경오염 문제로 인해 화석에너지의 사용 제한에 대한 규제가 앞으로 더욱 강력해질 전망이다. UN 산하 국제해사기구(IMO)에서는 황 함유량 0.5%를 초과하는 연료유에 대한 사용 규제를 결정하였으며 2016년 1월 이후 건조되는 엔진 출력 130 kW 이상의 선박에 대해서는 Table 1과 같이 Tier III를 적용하도록 하고 있다. 이런 배경으로 볼 때, 미래 선박의 연료는 친환경 적이어야 한다.

Table 1 Tier III Regulation

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh) n = engine' s rated speed (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 January 2000	17.0	$45.n^{-0.2}$ e.g., 720 rpm - 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44.n^{-0.23}$ e.g., 720 rpm - 9.7	7.7
III	1 January 2016	3.4	$9.n^{-0.2}$ e.g., 720 rpm - 2.4	2.0

또한 선박의 설계와 관리에 있어서 그 중요성이 강조 되는 것 중에 하나가 에너지 효율 증대이다. 대표적으로 SEEMP(Ship Energy Efficiency Management Plan)가 있으며, 이는 선박 에너지효율 관리계획서로써 2013년부터 400 GT(Gross Ton)급 이상의 선박에 비치하도록 하고 있다^[1]. 그 목적은 선박의 항행에 있어서 연료사용의 효율성을 높이고 객관적인 비교를 통해 에너지 손실을 감소시키는 것이다. Table 2는 SEEMP의 주요내용을 간략히 나타낸 것으로, 동력기관의 효율을 모니터링하고 있을 뿐만아니라

선체의 도장과 손상에 대해서도 관리 하도록 하고 있다. 이와 같은 규제는 앞으로 더욱 엄격해 질 것이므로 선박의 신 동력원에 대한 기술개발의 중요성은 더해갈 것으로 전망된다.

Table 2 Main contents of SEEMP

No.	Energy Efficiency Measure	Remark
1	Engine tuning & monitoring	Engine operational performance and condition optimization.
2	Hull condition	Hull operational fouling and damage avoidance.
3	Propeller condition	Propeller operational fouling and damage avoidance.
4	Reduced auxiliary power	Reducing the electrical load via machinery operation and power management.
5	Speed reduction	Operational slow steaming.
6	Trim/draft	Trim and draft monitoring and optimization.
7	Voyage execution	Reducing port times, waiting times, etc, and increasing the passage time, just in time arrival
8	Weather routing	Use of weather routing services to avoid rough seas and head currents, to optimize voyage efficiency.
9	Advanced hull coating	Re-paint using advanced paints.
10	Propeller upgrade and aft body flow devices	Propeller and after-body retrofit for optimization. Also, addition of flow improving devices (e.g, duct and fins)

선박에서 강조되고 있는 대기오염관리와 에너지효율이라는 두 가지 측면으로 볼 때, 현재 대부분의 선박에서 사용되는 디젤기관은 많은 제한점을 가지고 있다. 가장 큰 단점은 화석연료 사용으로 인한 불가피한 대기오염물질의 배출이라는 것이다. 이에 대한 대안으로 Fig. 1과 같이 태양열과 풍력 등의 동력원을 선박에 적용하는 기술이 검토되고 있다^[2]. 그러나 이것은 선박의 가혹한 운전조건을 고려할 때 안정적인 추진 동력원으로 사용되기는 아직 어렵다. 이러한 점에서 수소를 이용한 연료전지시스템의 적용이 대두되고 있으며 이미 육상에서는 Fig. 2와 같이 상용화된 연료전지자동차가 도로 위를 달리고 있다. 선박에서도 수소에너지를 이용한 연료전지시스템의 적용은 기술적인 뒷받침이 된다면 대단히 합리적인 선택이다. 청정에너지라고 불리는 수소는 모든 동식물, 물, 석탄, 석유를 구성하는 성분원소의 하나로서 영국의 화학자 헨리 캐번디시(Henry Cavendish)에 의해 처음 발견되었으며 우주에서 존재하는 가장 가볍고 풍부한 분자로 냄새와 색깔이 없다^[3]. 수소는 연소하기 쉬운 기체로 공기와 접촉하게 되면 쉽게 불이 붙는다. 또한 공기와 혼합기체에 불꽃을 튀겨주면 조건에 따라 수소는 폭발적인 연소 반응을 보이기도 하며 특히 폭발이 일어나는 농도 범위가 다른 기체보다 상대적으로 크다. 따라서 수소는 적절한 조건으로 통제하여 사용하지 않으면 유효한 에너지가 아닌 위험한 폭발물이 될 수 있다. Table 3에 수소의 주요 특성을 나타내었다.



Fig. 1 선박에 적용되는 친환경 동력원의 예



Fig. 2 수소에너지를 이용한 연료전지자동차

Table 3 Specification of hydrogen

No.	Property	Specification
1	Molecular weight	2.016
2	Boiling point	-252.8℃
3	Melting point	-259.1℃
4	Specific gravity	0.0695
5	Critical pressure	12.759atm
6	Critical temperature	-259.9℃
7	Liquid density	70.8kg/m ³
8	Gas density(20℃, 1atm)	0.083764kg/m ³
9	Thermal conductivity(20℃, 1atm)	1.897mW/cm · K
10	Heat of vaporization	445.59kJ/kg
11	Heat of vaporization(HHV)	141.86kJ/kg
12	Diffusion constant(in air)	0.634cm ² /s

수소에너지를 사용함에 있어 안전한 수소의 저장과 공급은 무엇보다 중요하다. 폭발 위험성이 크고 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에 제조와 저장의 과정에서 그 안정성이 담보되지 않으면 대단히 위험하다. Fig. 3에 보이는 1937년 5월 ‘힌덴부르크호 대참사’는 부력의 용도로 사용된 수소가스가 폭발한 사고이며, 이는 수소의 위험성을 경각시킨 대표적인 사고로 기록되고 있다.[4] 따라서 수소에너지를 이용하고자 할 때, 수소의 특성을 고려한 안정성 평가가 필수 수반되어야 한다. 우리 주변에서도 수소가스를 취급하는 대학의 연구실, 화학제조공정을 진행하는 공장 등에서 수소로 인한 크고 작은 사고 사례를 접할 수 있다. Fig. 4는 2010년 군산에서 발생한 수소가스 폭발사고로써, 공기와 수소의 혼합가스로부터 화재가 발생하여 대형폭발로 이어진 인명사고이다[5]. 사진을 통해 수소가스 폭발로 인해 건축물의 지붕이 손상된 것이 보인다. 이를 통해 수소가스 누출에 따른 환기의 중요성을 알 수 있다. 그 이유는 수소의 가벼운 특성 때문에 누출된 수소가스는 밀폐된 공간의 상부부터 집적되고 신속한 배출이 이루어지지 않는다면 그림과 같이 대형사고로 이어질 수 있기 때문이다.

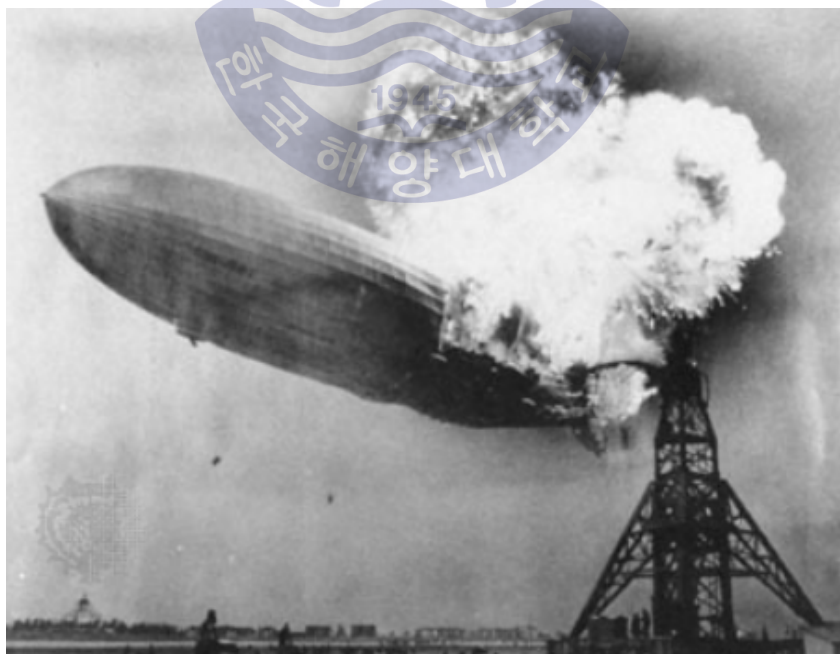


Fig. 3 힌덴부르크호 대참사



Fig. 4 밀폐 공간의 수소가스 폭발사고 (2010년, 전라북도 군산)



1.2. 연구 목적

앞서 밝힌 것과 같이 선박에서 대기오염방지, 에너지효율성 증대의 이유로 신 동력원으로써 수소에너지의 사용이 검토되고 있다. 연료전지는 수소에너지를 사용하는 대표적인 동력장치로 선박에서도 연료전지시스템 적용을 위한 연구가 진행 중이며[6], 본 연구는 소형선박에 연료전지시스템을 적용하는 기초 단계로서 연료전지의 연료 공급원인 수소가스의 저장과 누출을 고려한 효율적인 환기조건에 주안점을 두고 검토하였다.

Fig. 5는 수소가스를 사용하는 고분자전해질형 연료전지의 기본원리를 나타내며 연료 극으로 공급되는 수소가스는 수소이온과 전자로 분리되어 전자는 외부회로로 이동하여 전기를 발생하고 수소이온은 전해질을 통과하여 공기극으로 공급된 산소와 반응하여 물로 변환된다.

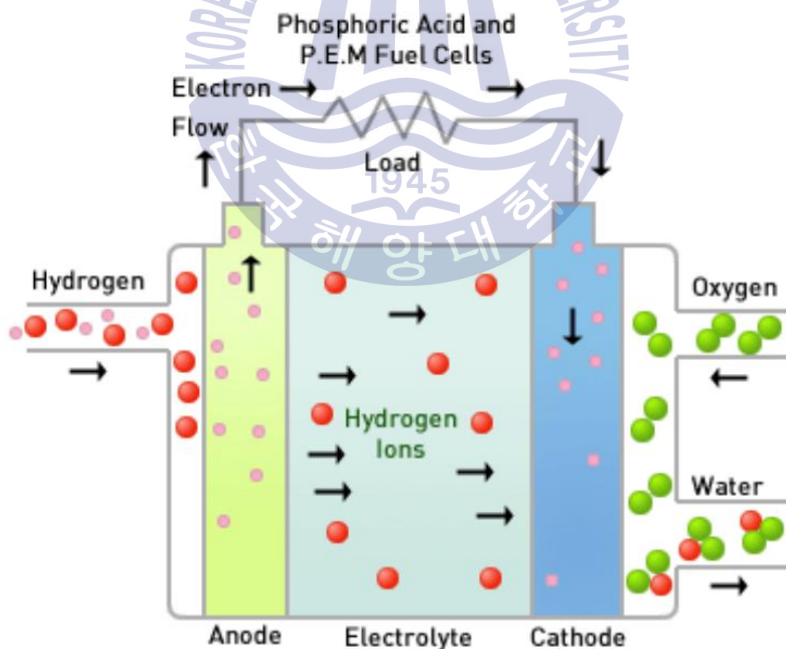


Fig. 5 연료전지의 기본원리

연료전지의 구동을 위한 수소의 저장은 크게 3가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 고압가스, 두 번째는 극저온의 액체상태, 세 번째는 흡장에 의한 저장이다. 고압가스는 기술적으로 가장 간단한 방법으로 소량의 가스 저장에 사용되고 있으며 수소를 가압하여 고압탱크에 기체 상태로 저장하는 것이다. 극저온의 액체로서의 저장은 약 22K(251.3℃)의 극저온에서 수소가스를 액화시켜 액체 상태로 저장하는 것으로 수소의 대량저장에 용이하다. 흡장에 의한 저장은 고압이나 저온 등 특수한 상태에서 수소를 흡수하고 압력이나 열 변화에 의해 다시 수소를 방출하는 성질을 이용하는 방법으로 대표적으로 금속수소화물이 있다⁷⁾. Table 4는 수소저장 방식에 따른 특징을 나타낸다.

Table 4 Features according to hydrogen storage methods

방 식	고압가스	액화수소	흡장합금
장점	- 가볍고 간단함	- 대용량 저장에 유리	- 저장용량이 큼 - 수소사용이 편리
단점	- 고압충전시설 필요 - 대용량 저장 어려움 - 폭발 가능성 높음	- 초저온 유지로 인해 대형시설이 필요 - 에너지 손실이 큼 - 소형화가 어려움	- 무게가 무거워 육상 운송수단에 사용이 어려움
주 사용처	- 자동차 등 운송수단 휴대용 소형품	- 수소충전소, 핵융합로, 우주선	- 잠수함, 대형선박, 지게차 등

본 연구는 소형선박에 연료전지시스템을 적용하는 기초연구로서 수소저장의 안정성을 검토하고자 한다. 국내의 ‘선박안전법’에서 정의하는 소형선박은 길이가 12m 미만인 것으로 소형선박의 크기와 구조를 고려할 때 고압가스의 방법으로 수소를 저장하는 것이 합리적이라고 판단된다. Fig. 6은 일반적인 소형선박에 고압가스 방법을 적용한 자동차용 고압수소탱크를 배치할 때, 수소탱크 저장실을 간략하게 나타낸 것이다. 소형선박의 양현에 2개의 수소탱크 저장실을 만들고 1개의 수소탱크 저장실에 4개의 자동차용 고압수소탱크가 배치 가능하도록 만들었다. 수소탱크는 현재 상용화된 연료전지자동차

에 쓰이는 700 bar 고압수소탱크의 형상을 단순화한 것이다. 자동차용 수소가스 탱크를 선택한 이유는 소형선박에 탑재가 가능한 크기이며 고압탱크로서 그 안전성이 이미 많은 실험에 통해 검증되었고 범용성이 높기 때문이다.

위와 같은 내용을 바탕으로 소형선박에 적용되는 수소탱크 저장실 내부의 탱크에서 수소가스누출을 가정하고 누출위치, 급기구 그리고 배기구의 위치를 변경하면서 ANSYS CFX(v. 17.1)를 이용하여 3차원 전산해석을 실시하였다. 앞서 연구배경에서 밝힌 것과 같이 누출수소에 의한 폭발사고는 수소의 특성에 기인한 것으로 일반적인 환기방법에 의한 안정성 예측은 대단히 위험하다고 생각된다. 따라서 수소의 저장 방식과 주변 환경에 따라 적합한 설계가 필요하며 본 연구에서는 고압수소탱크를 저장하는 탱크 저장실의 급기구와 배기구의 조건을 변경하면서 효율적인 누출수소의 배출조건을 분석하였다.

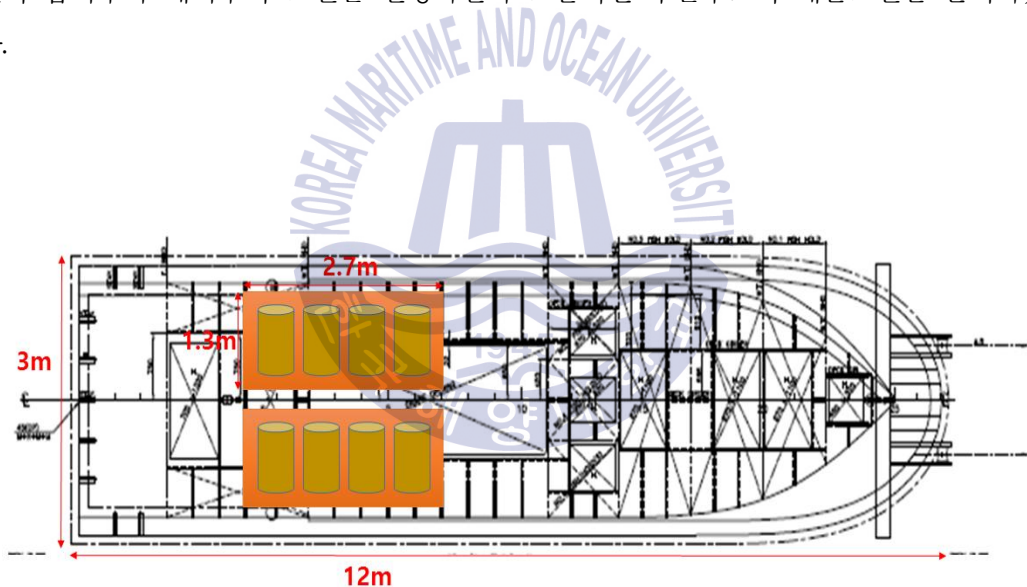


Fig. 6 소형선박에 적용 가능한 수소탱크 저장실의 배치

2. 수소탱크 저장실의 모델링 및 수치해석

2.1. 수소탱크 저장실 형상과 관련규정

수소탱크가 배치된 수소탱크 저장실의 형상을 만들기 위해 관련규정을 확인하였다. 그 이유는 본 연구가 소형선박의 연료전지시스템 적용을 위한 기초 연구로서 추후 실증 연구가 수행된다면 본 연구결과의 활용성을 높이기 위해서이다. 선박용 연료전지와 관련된 국내 규정은 한국선급(KR)에서 제공하는 ‘선박용연료전지시스템 지침(2015)’이 대표적이며, 소형선박에 연료전지시스템이 적용 가능한 다른 지침은 현재 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한국선급(KR)에서 제공하는 ‘선박용 연료전지 시스템 지침(2015)’에 근거하여 수소탱크 저장실의 형상을 만들고 전산해석 시 통풍과 관련된 경계조건도 이 규정에 근거하여 적용하였다.[8]

Table 5, Table 6 그리고 Table 7은 수소탱크 저장실의 형상설계와 관련된 장비의 배치, 시스템구성, 통풍 그리고 가스 탐지에 관한 주요 규정을 발췌한 것이다. Table 5에서는 수소저장의 구성에 관하여 폭발성 가스의 효과적인 배출을 위해 가능한 단순한 형상을 가져야 한다고 규정하고 있으며 또한 두 개 이상의 탱크가 각각 다른 구획에 배치하도록 규정하고 있다. 이를 통해 Fig. 6에서와 같이 선박의 양현에 2개의 수소탱크 저장실을 배치하는 것이 합당하는 것을 알 수 있다. Table 6에서는 통풍 장치의 종류가 강제 배기식으로 설치 되도록 규정하고 있다. 그 이유는 폭발의 위험이 있는 영역에 화재 확산이 되지 않도록 하기 위해서이다. 또한 통풍용량은 1시간 동안 수소탱크 저장실의 전체 용적에 해당하는 공기를 30회 교환이 가능한 용량이다. Table 7에서는 가스 탐지에 관해서 규정하고 있으며 만약 수소가스가 누출 된다면 수소의 폭발 한계치를 고려하여 감지되는 경보 장치를 설치해야 함을 명시하고 있다.

Table 5 Regulations on arrangement and system configuration of fuel cell

제3장 구조 및 설비, 제1절 배치 및 시스템 설계
<p>103. 구역의 위치와 분리,</p> <p>1. 구역의 배치 및 위치</p> <p>- 연료전지용 연료의 저장, 분배 및 사용을 위한 구역의 배치 및 위치는 위험구역의 수 및 범위를 최소화하는 것이어야 한다. 이들 구역은 폭발성 기체의 체류 가능성을 최소화하기 위하여 가능한 한 단순한 형상과 내부 배치를 가져야 한다.</p>
<p>106. 시스템 구성</p> <p>2. 가스 안전 연료전지 구역.</p> <p>- 연료전지용 연료 공급관내의 누설로 연료전지용 연료 공급을 차단할 필요가 있는 경우, 2차의 독립 연료공급 장치를 갖추어야 한다. 대안으로, 복수의 연료전지 동력장치가 설치된 경우, 각 연료전지 동력장치를 위한 독립적이고 분리된 연료전지용 연료 공급 장치를 인정할 수 있다.</p> <p>- 연료전지용 연료는 거의 같은 크기를 갖는 두개 이상의 탱크에 나누어 저장하여야 한다. 탱크들은 별도의 구획에 위치하여야 한다.</p>

Table 6 Regulations on ventilation systems

제3장 구조 및 설비, 제1절 배치 및 시스템 설계
<p>110. 통풍장치</p> <p>1. 일반사항</p> <ul style="list-style-type: none"> - 연료전지용 연료로 인하여 인화성 가스 혼합물이 형성될 위험성이 있는 구역은 이들 구역의 밖에서 제어할 수 있는 배기식 기계 통풍장치를 갖추어야 한다. - 통풍장치는 모든 구역에서 충분한 공기 순환이 보증되어야 하고, 특히 실내에 가스포켓의 형성 가능성이 없음이 보증되어야 한다. - 급기 구는 구역의 하부에 연결되어야 한다. <p>3. 가스 탱크실</p> <ul style="list-style-type: none"> - 가스저장용 탱크 실에는 시간당 최소 30회 이상의 환기능력을 갖는 부압 형식의 유효한 기계식 통풍장치가 설치되어야 한다. 다른 적절한 방폭의 수단이 설치된 경우에는 환기횟수를 줄일 수 있다. 대체수단의 동등성에 대해서는 안전성 분석에 의해 증명이 되어야 한다.

Table 7 Regulations on hydrogen gas detection

제3장 구조 및 설비, 제4절 제어 및 감시 안전시스템
<p>404. 가스 탐지</p> <ul style="list-style-type: none"> - 각 구역의 탐지기 개수는 반드시 구역의 크기, 배치, 공기 중 연료 농도 및 통풍을 고려하여 결정되어야 한다. - 탐지 장비는 가스가 축적될 수 있는 장소 및/또는 통풍 출구 측에 위치하여야 한다. 최상의 배치를 찾기 위하여 가스 분산 분석 또는 물리적 연기 시험이 이용되어야 한다. - 증기 농도가 최저 폭발 한계(LEL)의 20 %에 도달하기 전에 가시·가청 경보가 발하여야 한다. 연료전지용 연료 관을 둘러싸고 있는 통풍 덕트에 대하여는, LEL의 30 %에서 경보가 울리도록 설정될 수 있다. 참고로, 최저 폭발 한계는 공기 중 수소는 농도 4 %, 메탄은 5.3 %, 그리고 프로판은 1.7 %이다.

2.2. 수소탱크의 형상

앞서 밝힌 바와 같이 본 연구에서는 연료전지 자동차용으로 상용화된 고압 수소탱크의 형상을 단순화 하여 모델링에 적용하였다. 2005년, 연료전지자동차용 수소저장 고압용기의 국산화 개발이 성공하였다^[9]. Fig. 7의 (a)는 국내기술로 개발되어 (주)ILJIN Composites(일진복합소재)에서 양산하는 연료전지 자동차용 고압 수소탱크이며 Table 8에 탱크의 사양을 나타낸다^[10]. 그리고 (b)는 Table 8을 바탕으로 ANSYS Geometric을 이용해 만든 3D형상이다.



(a) 연료전지 자동차에 사용되는 수소탱크

(b) 본 연구에 사용되는 수소탱크 3D 형상

Fig. 7 고압 수소탱크의 실물과 3D 형상

Table 8 Specification of high-pressure hydrogen gas tank

Model Name	Service Pressure	Outer Diameter	Length	Weight	Water Volume	Certificates
HT700-104F	700 bar	539mm	900mm	84kg	104L	EC-79, KGS

2.3. 수소탱크 저장실의 형상

Fig. 8의 (a)는 4개의 수소탱크가 배치된 수소탱크 저장실의 형상이며 (b)는 1개의 수소탱크가 배치된 저장실의 형상이다. 본 연구에서는 수소탱크 형상을 저장실 내부 중앙에 배치하고 부가적인 구조물은 제거하였으며 Fig. 8의 (b)의 형상을 이용하여 CFD 기법을 적용한 전산해석을 수행하였다. 그 이유는 수소탱크 1개를 배치한 저장실 내의 유동해석 결과는 4개의 수소탱크가 배치된 저장실에도 확장 적용이 가능하고 추후 설계자의 의도에 따라 2개 혹은 3개의 수소탱크를 저장한 저장실의 모델링에도 적용이 가능하도록 가장 기본이 되는 형상을 해석하는 것이 합당하다고 판단했기 때문이다. 그림을 살펴보면 저장실의 바닥면을 제외한 외부 벽면은 길이 0.15 m의 정사각형 모양으로 구획이 나누어져 있다. 그 이유는 급기구와 배기구의 위치 조건에서 나타나는 유동특성을 확인하고자하는 연구목적에 따라 다양하고 쉽게 급.배기구 위치 변경이 가능하도록 하기 위해서 이다. 즉, 길이 0.15 m의 정사각형 모양의 조합에 따라 다양한 위치와 크기의 급.배기구 배치가 가능하다.

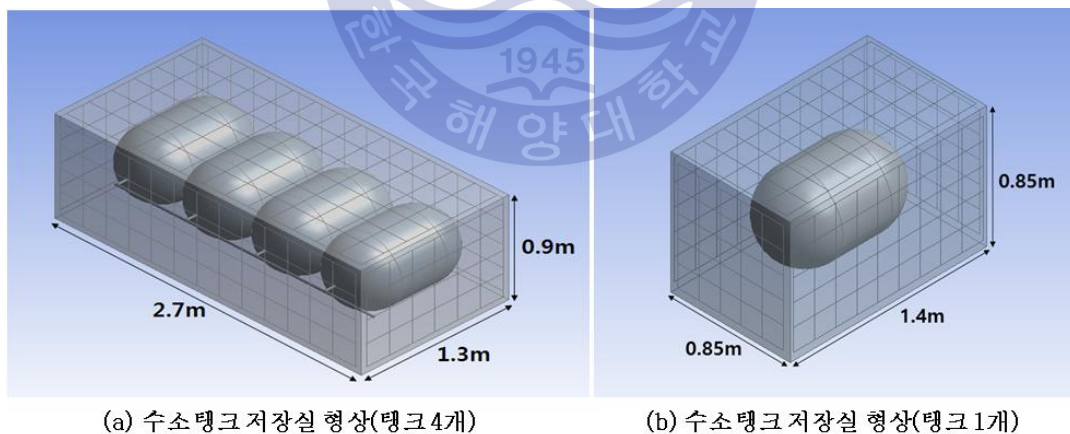


Fig. 8 수소탱크 저장실 3D 형상

2.4 수소가스 누출 해석

2.4.1. 종래의 연구

청정에너지로써 수소는 사용가치가 높기 때문에 수소에너지의 상용화를 위한 많은 실험과 연구가 진행되고 있다. 그 중에 대표적인 분야가 바로 수소에너지의 안전과 관련된 연구이다. 수소는 가연범위가 넓고 폭발의 위험성이 크기 때문에 저장과 수송의 과정에서 누출이 일어나게 된다면 매우 위험하다. 따라서 수소가스 누출 시, 확산양상과 가연영역 그리고 유동해석에 관한 많은 실험적 연구가 진행되고 있다. 본 장에서는 그 중에서 CFD기술을 활용한 수소누출과 폭발에 관련된 종래의 연구를 소개하고 그 결과를 간략히 언급하고자 한다.

CFD기술은 자동차, 항공, 화학, 등 다양한 분야에서 사용되는 강력한 도구로써 그 결과의 신뢰성이 증명되어 왔다. CFD를 이용한 연구의 장점은 경제적, 또는 안전상의 이유로 현실적으로 실제 실험이 어려운 경우에 시뮬레이션을 통해 실제 실험과 가까운 결과를 도출 할 수 있다는 것이다. 이 과정에서 CFD 해석 결과의 오류를 줄이고 그 신뢰성을 높이기 위해서는 연구자가 원하는 실험에 대한 물리적인 이해와 적절한 경계 조건 그리고 가정을 적용해야 한다. 그리하여 도출한 결과는 그 신뢰성과 정확성을 증명하는 과정이 필요하다.^[11] 실제 실험을 통한 결과와 비교를 하는 것이 CFD의 신뢰성을 확보하는 가장 확실한 방법이다.

CFD 기술은 다양한 방면에서 활용되고 있지만 가스의 확산과 폭발의 분야에서는 보안해야 할 점이 많이 있다.^[12] Middha, et al. (2009)의 연구 결과에서 수소가스의 확산에 관하여 아음속과 초음속으로 나누어 실제 실험결과와 CFD를 이용한 결과를 비교 분석하였다.^[13] 그 결과, CFD를 이용한 시뮬레이션 결과가 실제의 실험 결과와 상당히 일치하는 것이 확인되었다. 이는 정확한 조건과 수소 누출영역의 조건을 어떻게 표현하는가에 달려 있다. 많은 연구자들이 실험을 통해 수소가스의 확산에 대해서 실험과 CFD를 통해 시뮬레이션을 동시에 진행하고 있다. Schmidt, et al.(1999)은 범용 CFD Code로 널리 사용되는 Fluent를 이용하여 빌딩 사이에서의 수소가스 누출 시뮬레이션을 실시하였다^[14]. 그 결과, 벽과 같은 장애물 그리고 누출영역





주변의 풍속 등이 수소가스의 확산에 영향을 미친다는 것을 확인 하였다. Pitts, et al. (2012)는 실제 자동차를 배치한 차고 내에서 수소가스의 확산과 폭발에 관한 실험을 진행하였다^[15]. 그 결과, 차고와 같은 밀폐된 공간에서 누출수소의 확산과 가연영역을 확인하였고 그로 인한 화재의 위험성이 증가함을 확인하였다. 또한 Matsuura, et al. (2008)은 2.6m³의 용적의 직사각형 제작모형에 공기가 통하도록 통풍 구역을 만든 다음, 모형의 하부에서 수소가스를 분출하여 모형 내부의 4개의 센서 위치에서 시간에 따른 수소의 체적 분율을 감지하는 실험을 진행하였다^[16]. 그 결과, 환기조건에 따라 누출수소의 거동이 변화됨을 확인하였다. He, et al. (2016)은 1.68m³의 용적의 밀폐형 직사각형 제작모형에서 헬륨가스를 분출하여 실험을 진행하였다^[17]. 이와 같이 수소의 특성상 폭발 위험이 크기 때문에 헬륨 가스를 이용하여 수소가스의 확산을 모사한 실험도 있다. 마지막으로 Salva, et al. (2012)은 수소 연료전지 자동차의 3D 형상을 만들고 CFD 기법을 적용하여 누출수소를 고려한 유동을 시뮬레이션 하였다^[18]. 그 결과, 가벼운 수소의 특성과 차량의 내부를 고려한 최적의 수소가스 탐지기의 위치를 제안하였다.

그 밖에도 수소가스의 확산을 CFD 기법을 이용해 해석하는 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 밀폐된 저장실의 공간에서 통풍조건에 따른 공기 중으로 확산되는 수소가스의 유동을 해석하기 때문에, 이와 유사한 조건을 가진 실험결과를 채택하여 3차원 모델링을 만들고 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교함으로써 수소탱크 저장실에 적용되는 모델링의 신뢰성을 확보하였다.

2.4.2. 수소탱크의 균열 상태에 따른 수소누출

본 연구는 700 bar의 고압 수소탱크로부터 수소누출을 고려한 유동특성 해석하기 때문에 누출되는 수소의 상태에 대해서 검토해야 한다. 누출수소의 형태는 누출영역의 형상과 속도 등에 의해 결정되며 따라서 수소가스를 저장하는 고압탱크의 재질이나 파공가능성에 대해 선행적으로 파악해야 탱크 표면에서 발생하는 누출수소의 상태를 유추할 수 있다. 고압 수소탱크의 제작 기술은 충분히 성숙한 기술로써 Table 9와 같이 4개 type으로 구분되어진다.^[19] 현재 연료전지 자동차에는 Type-IV의 고압 수소탱크가 사용되며 이는 여러 개의 탄소섬유가 중첩되어 제작되기 때문에 상당한 수준의 안전성이 확보되지만 수소가스 누출의 위험이 전혀 없을 수는 없다. 그렇기 때문에 탱크 자체의 안전성에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으면 대표적으로 Ramirez, et al. (2015)은 Type-IV 고압 수소탱크의 내부에 형성되는 응력을 CFD를 이용해 시뮬레이션하고 실험값과 비교하였다^[20]. 이를 통해 탱크 내부의 응력의 변화가 존재하며 파손의 위험이 있음을 알 수 있다.

Table 9 Types of high-pressure hydrogen gas tank

Type- I	Type- II	Type- III	Type- IV
			

본 연구에서는 일반적으로 생각할 수 있는 탱크의 균열을 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 2 가지로 분류하였다. 그림 (a)는 탱크를 관통하는 일정크기의 파공이 발생된 형태이며 그림 (b)는 불규칙한 균열이 발생된 형태이다. 비교적 저압의 유체를 저장하는 얇은 두께의 용기에서 누설이 발생한다면 그림 (a)와 같은 균열 형상이 발견될 가능성이 있으나, 700 bar의 고압의 수소가스를 저장하는 탄소섬유를 중첩하여 제작한 탱크에서는 이와 같은 파공이 발생되기는 현실적으로 어렵다고 판단된다. 오히려 그림 (b)와 같이 불규칙한 균열이 발생되어 소량의 가스가 누설하는 것이 합리적인 추측이다. 탱크 균열에 따라 주변 조건을 바탕으로 누출수소의 분출형상을 유추 할 수 있는데, 그림 (a)와 같이 일정크기의 파공이 발생한다면 탱크 내부와 외부의 압력차이로 인해 누출 영역에서 질식유동이 형성될 것이고, 그림 (b)와 같이 불규칙한 형상의 균열은 래버린스 실(Labyrinth seal)에서의 유동과 유사하게 수소가스가 균열영역을 통과하면서 압력강하 일어나 분출되는 수소가스 속도는 음속이하가 될 것이다[21]. 2.4.3 장에서 좀 더 구체적으로 두 가지 경우에 대한 기존의 연구결과를 검토하고 본 연구에 적용되는 수소 누출조건에 대해서 확인하였다.

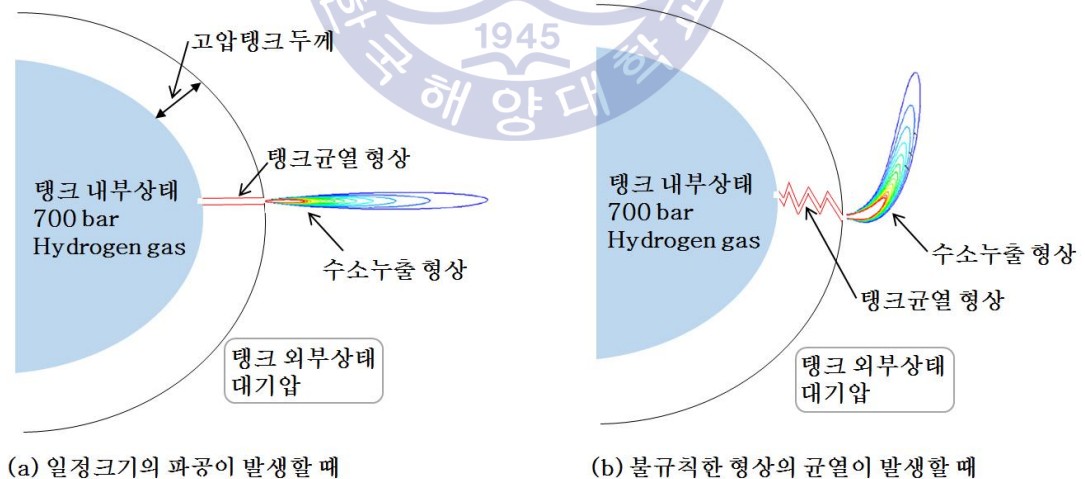


Fig. 9 탱크의 균열 상태에 따른 수소누출

2.4.3. 모델링에 적용되는 수소누출 조건

Han, et al. (2014)은 Fig. 10과 같은 실험 장치를 통해 최대 400 bar의 압력으로 실제 수소가스 분출실험을 통해 고압수소탱크의 누출에 관해 연구하였다[22]. 수소 분출 영역에 0.5 mm, 0.7 mm, 1.0 mm의 오리피스를 설치하여 각각 100 bar, 200 bar, 300 bar, 400 bar 압력으로 실험을 진행하였다. 수소의 누출영역에서는 초킹현상(Chocking flow)으로 인해 오리피스에서의 속도는 수소의 음속이 된다. 그리고 유동이 음속유동(Mach number=1)에 도달할 때의 압력을 임계 압력이라고 한다. 수소의 음속은 식 (1)과 같이 나타내고 임계 압력은 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$C_{H_2} = \sqrt{kRT} \quad (1)$$

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (2)$$

여기서, C_{H_2} 는 수소의 음속(m/s), k 는 비열비(c_p/c_v), R 은 기체상수($J/[kg \cdot K]$), T 는 절대온도(K), P^* 은 임계압력(Pa), P_0 은 탱크 내의 압력(Pa)을 나타낸다. 음속은 온도에 따른 함수이며, 이 실험에서는 상온 15℃를 기준은 수소 음속을 1300m/s로 계산되었다. 실험을 통해 Fig. 11과 같은 현상이 확인 되었다.

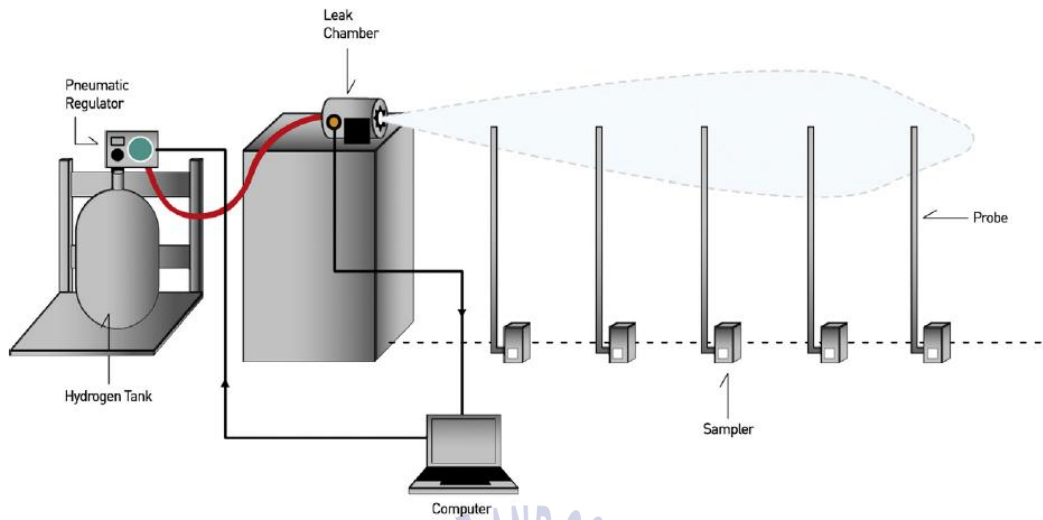


Fig. 10 Han, et al. (2014)의 고압수소 분출 실험 모식도

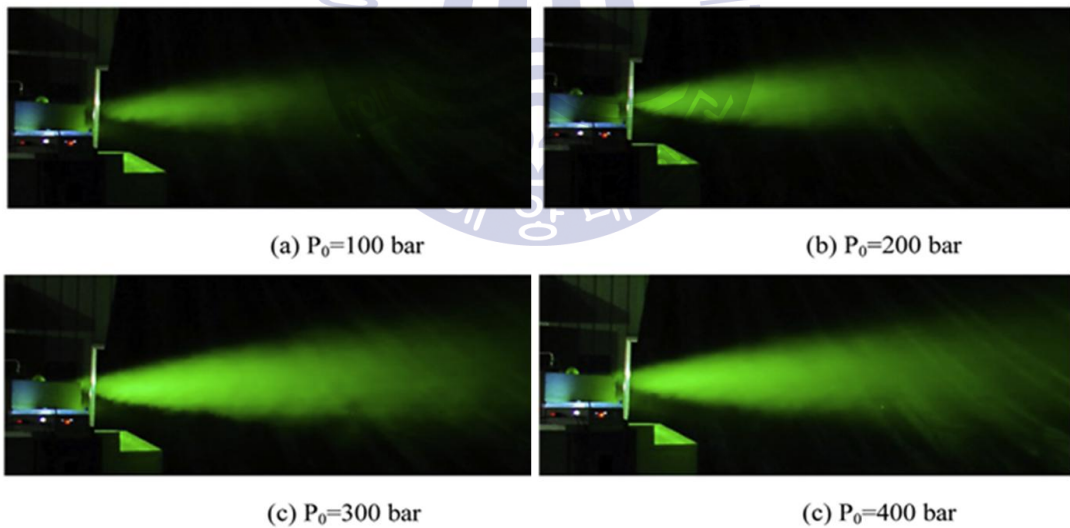


Fig. 11 Han, et al. (2014)의 고압수소 분출 실험결과

Fig. 11을 통해 수소가 지구상에 가장 가벼운 물질임에도 불구하고 고압의 상

태에서 분출 시, 부력의 영향을 거의 받지 않고 횡 방향 직선의 형태로 분출되는 것을 알 수 있다. 이와 관련한 또 다른 연구결과를 살펴보면, Houf and Schefer(2007)의 논문에서는 누출 영역의 직경과 분출되는 수소의 밀도 프라우드 수(Densimetric Froude number)에 따른 부력의 영향 정도를 Fig. 12와 같이 나타내고 있다^{[23][24]}.

프라우드 수(Froude number)는 유체에 미치는 관성력과 중력의 영향을 무차원수로 표현한 것이다. 예를 들어 프라우드 수가 1보다 크면 관성력의 영향이 중력의 영향보다 크다는 것을 의미 한다^[25]. 프라우드 수($Fr.$)는 식 (3)과 같이 정의한다.

$$Fr. = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

여기서, U 는 유체의 속도(m/s), g 는 중력가속도(m/s^2), L 은 거리(m)을 나타낸다. 중력장 하의 자연대류(Natural convection)의 상태에서 무거운 유체 속의 놓인 가벼운 유체는 중력과 반대 방향인 위로 밀어 올리는 부력이 작용 한다^[26]. 즉 가벼운 수소가스가 공기 중으로 확산 될 때, 부력의 영향을 받기 때문에 프라우드 수(Froude number)에서 분모에 해당하는 중력에 밀도차를 고려해야 한다. 식 (4)은 공기와 수소가스의 밀도 차이를 고려한 밀도프라우드 수(Fr_{dens} , Densimetric Froude number)를 나타낸 것이다.

$$Fr_{dens} = \frac{U_{exit}}{\sqrt{gD\left(\frac{\rho_{air} - \rho_{H_2}}{\rho_{H_2}}\right)}} \quad (4)$$

Fr_{dens} 은 밀도프라우드 수, U_{exit} 는 분출 속도(m/s), D 는 분출 직경(m), ρ_{air} 는 공기의 밀도(kg/m^3), ρ_{H_2} 는 수소의 밀도(kg/m^3)를 나타낸다.

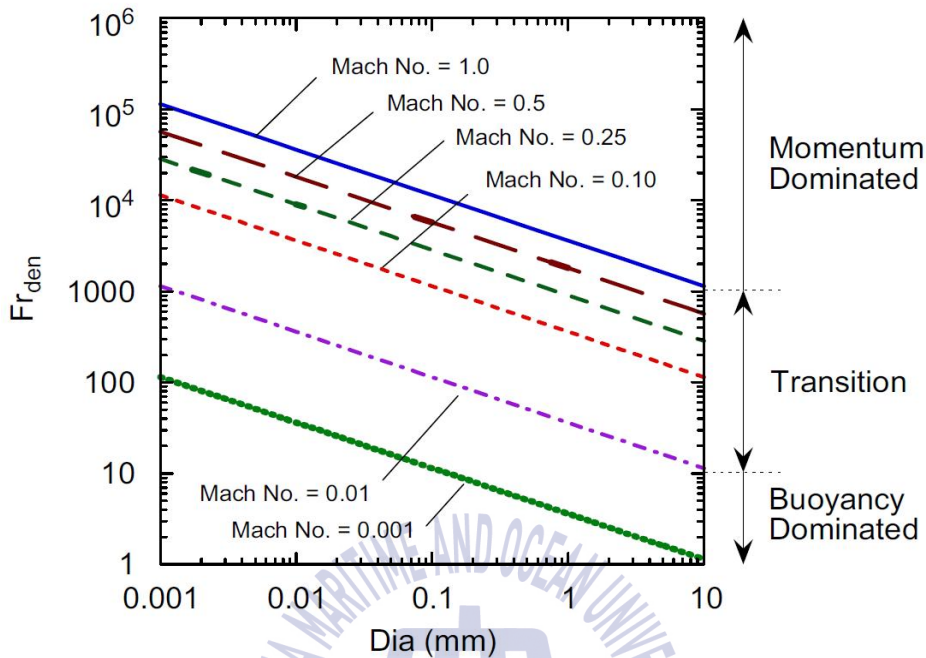


Fig. 12 밀도 프라우드 수에 따른 부력과 운동량의 영향

Fig. 12를 통해 밀도프라우드 수(Densimetric Froude number)가 10이하에서는 부력의 영향을 지배적으로 받는 것을 알 수 있다. 그리고 $10^3 < Fr_{dens} < 10^6$ 의 범위에서는 부력의 영향을 거의 받지 않는다. 마하수(Mach Number) 1은 그림에 나타난 누출 직경의 모든 범위에서 부력의 영향을 받지 않는 것으로 확인된다. 그렇기 때문에 Fig. 11의 결과와 같이 누출영역에서 음속으로 분출되는 수소가스는 부력의 영향을 거의 받지 않아 횡 방향으로 거의 직선의 형태로 누출되는 것이다.

앞서 밝힌 바와 같이 수소탱크에서 발생 가능한 균열형태를 2 가지로 가정할 때, Fig. 9의 (a)의 조건에서는 누출 영역에서 초음속 상태의 수소가 분출되어 부력의 영향을 거의 받지 않는 횡 방향 직선형태의 분출형상을 나타낼 것이다. 하지만 고압탱크의 수소누출에 있어 항상 초음속 상태만을 고려 할 수는 없다. 실제 여러 겹의 탄소섬유를 중첩하여 제작된 고압탱크에서 일정크기의 파공이

발생되기는 외부의 대단히 큰 충격을 제외하곤 현실적으로 어렵다. 따라서 본 연구에서는, 수소탱크에서 Fig. 9의 (b)와 같은 균열이 발생된다고 가정하고 아음속상태의 수소누출 조건을 모델링에 적용하였다. 이와 관련되어 Schefer, et al. (2007)는 Fig. 13과 같은 실험 장치를 통해 아음속 상태의 수소 누출에 관하여 연구하고 CFD 기법을 이용하여 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과를 비교하여 CFD 기법의 신뢰성을 확보하였다.

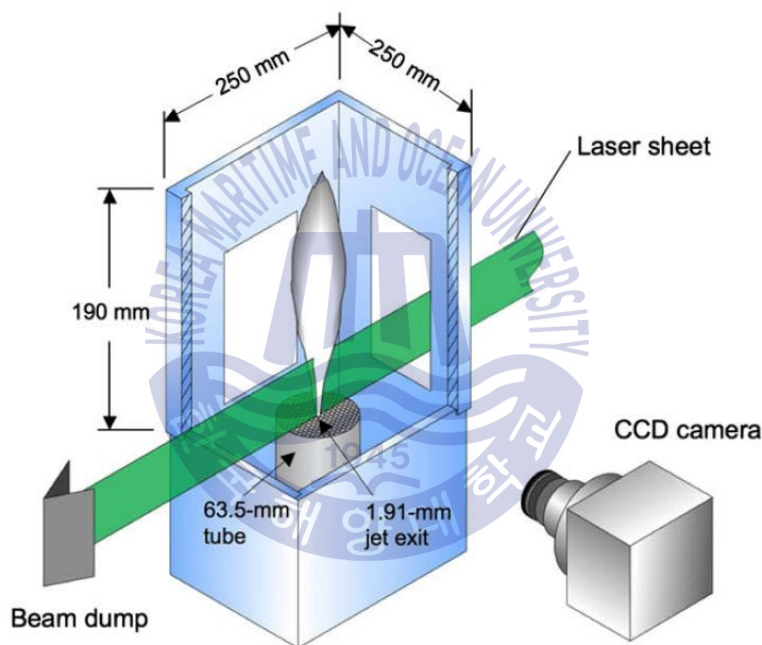


Fig. 13 Schefer, et al. (2007)의 수소 누출 실험 모식도

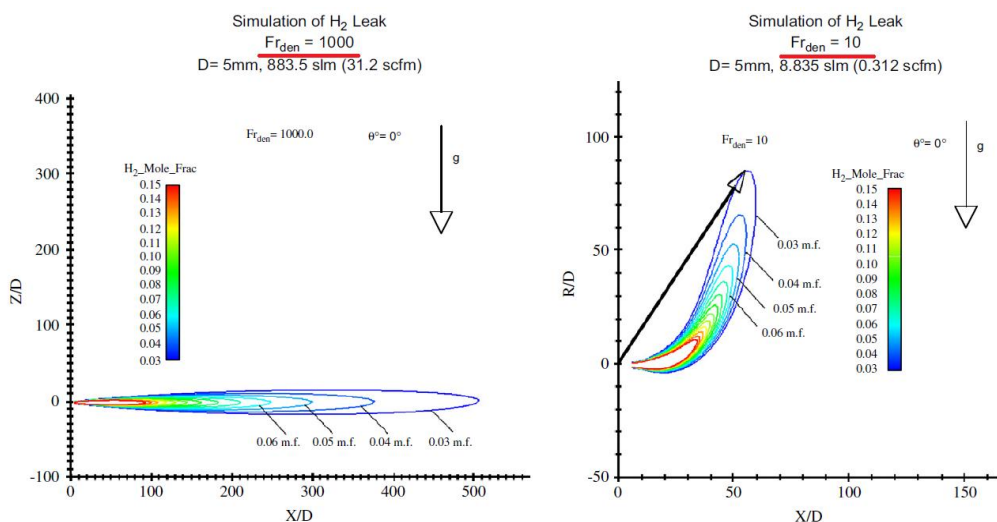


Fig. 14 밀도 프라우드 수에 따른 수소 분출 형상

Fig. 14는 밀도프라우드 수(Densimetric Froude number)변화에 따른 수소 분출 양상을 나타내고 있다. D 는 수소 누출의 직경(m), X 는 x 축 방향의 거리(m), Z 는 z 축 방향의 거리(m), 즉 높이를 나타낸다. 앞서 Fig. 12를 통해 $10^3 < Fr_{dens} < 10^6$ 범 위에서는 부력의 영향을 거의 받지 않고 운동량의 영향이 지배적인 것을 알 수 있다. 그에 따라 Fig. 14의 왼쪽 분포도는 밀도프라우드 수가 1000으로써 부력의 영향을 거의 받지 않아 횡방향 직선 형태로 수소가스가 분출되고 오른쪽 분포도는 밀도프라우드 수가 10으로써 공기와 수소의 밀도 차에 의한 부력의 영향을 크게 받아 분출과 동시에 수소가스가 위로 확산되는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 Houf and Schefer(2007)의 논문[23]에 나타난 밀도프라우드 수(Densimetric Froude number)가 268인 경우의 실험결과를 채택하여 수소탱크의 누출영역에 경계조건으로 적용하였다. Fr_{dens} 가 268인 조건을 선택한 이유는 Fig. 12에서 확인 가능하듯이 Fr_{dens} 268은 극단적으로 부력의 영향을 받거나 혹은 운동량의 영향을 받지 않는 천이영역으로써 충분히 합리적인 누출 조건이기 때문이다.

2.5. 수치해석

본 연구에서는 다양한 방면에서 유동해석에 우수한 성능을 보이는 ANSYS사의 CFX (v.17.1)을 사용하여 전산해석을 수행하였다. 수소탱크 저장실 내의 난류의 영향을 고려하기 위해 Standard $k-\epsilon$ model과 SST model을 사용하였다. 또한 벽면 근처에서 수치의 정밀도를 높이기 위해 종횡비(aspect ratio)가 매우 큰 격자, 즉 조밀도가 높은 격자를 적용하였다[27].

2.5.1. 지배방정식

CFD 상용코드인 ANSYS사의 CFX (v.17.1)에서는 유체의 흐름을 다루는 기본적인 방정식은 질량보존, 운동량, 에너지 방정식이고, 각각 식 (5), 식 (6), 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (7)$$

여기서 ρ 는 밀도, U 는 속도, τ 는 전단응력, S_M 은 운동량 생성항, h_{tot} 는 전엔탈피, λ 는 열전도도, S_E 는 에너지 생성항, T 는 온도를 나타낸다. 전단응력 τ 는 변형률 D 와 식 (11)과 같은 관계를 가진다. 변형률 D 를 벡터 형식으로 식 (10) 같이 나타낸다. 여기서, 만약 유체의 부피가 변하지 않는 비압축성의 경우에는 $\nabla \cdot U$ 가 0이 되기 때문에 전단응력 τ 는 식 (12)과 같이 단지 변형률에 비례하는 함수가 된다.

$$D = \frac{1}{2} [\nabla U + (\nabla U)^T] \quad (10)$$

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad (11)$$

$$\tau = \mu (\nabla U + (\nabla U)^T) \quad (12)$$

여기서 $-\frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U$ 는 스톡스의 가설(Stokes' s hypothesis)에 의한 것으로써 이것은 유체역학적 압력과 열역학적으로 정의되는 압력이 완전히 동일하지 않기 때문에 이 둘을 같게 만들기 위해서 만들어진 가설이다. 열역학에서 에너지보존 법칙에 따라 유체의 점성에 의해 수반되는 에너지 변환이 있다. 이 점성에 의해서 일을 할 수 있는 에너지가 소산되어 열과 내부에너지로 변화되는 것을 점성소실(Viscous dissipation) 이라 한다. 이 차이를 같게 만들어주기 위해서 $\lambda + \frac{2}{3}\mu = 0$ 는 가정에서 식 (11)이 나왔다^[28].



2.5.2. 난류모델링

수소가 누출되는 영역에서의 유동을 세밀하게 모사하기 위해서는 압축성을 고려하여 유동해석이 필요하지만, 본 연구에서는 수소 누출이 일어나는 영역을 입구 경계조건으로 설정하여 압축성 유동 해석이 필요하지 않다. 그러나 대략적으로 경계면에서의 난류를 예상하기 위해서 본 연구에서는 Medium-turbulence (Intensity 5%)로 수소 누출 경계면에서 난류강도를 설정하여 해석하였다. CFX에서는 식 (13)에서와 같이 난류강도 I (Intensity)를 정의한다.

$$I = \frac{u'}{U} \quad (13)$$

여기서 u' 는 난류속도, U 는 평균유속을 의미한다. 전체 해석영역에서의 난류 모델은 Standard $k-\epsilon$ model 모델을 사용하였다. 식 (14)과 같이 유동에서의 실제점도를 의미하는 유효점성을 나타낼 수 있다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (14)$$

위 식에서 μ_t 는 난류 점성계수를 의미하며 Standard $k-\epsilon$ model 모델에서는 이것을 난류운동에너지와 난류 소산율의 관계로 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (15)$$

C_μ 는 계수로 0.09를 사용한다. 위 식에서 난류운동에너지 k 와 난류 소산율 ϵ 은 식 (16)과 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon b}) \quad (17)$$

CFX code에서 $C_{\epsilon 1}$ 은 1.45, $C_{\epsilon 2}$ 은 1.9, σ_k 는 1.0, σ_ϵ 은 1.3으로 나타낸다. 여기서, P_{kb} 와 $P_{\epsilon b}$ 는 부력의 영향, P_k 는 점성력에 의한 난류 생성을 나타낸다.

2.5.3. 화학종 수송 방정식

난류 유동에서 특정 상태량에 대한 수송방정식은 식 (18)로 나타낸다. 검사 체적 내의 수소의 확산을 해석하기 위해서 화학종 수송 방정식은 식 (19)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot \left((\rho D_\phi + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla \phi \right) + S_\phi \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\rho X_{H_2})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U X_{H_2}) = \nabla \cdot \left((\rho D_\phi + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla X_{H_2} \right) + S_\phi \quad (19)$$

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, ∇ 는 구배연산자, U 는 유체의 속도벡터, X_{H_2} 는 수소농도, D_ϕ 는 확산계수, μ_t 는 난류점성계수, Sc_t 는 난류 Schmidt 수, S_ϕ 는 생성항을 의미한다.



2.6. 수소 누출에 관한 CFD 적합성 검증

2.4.3 장에서 밝힌 바와 같이 본 연구에서는 Schefer, et al. (2007)에 의해 실험된 아음속 상태의 수소누출 실험을 채택하여 모델링의 누출영역에 경계조건으로 적용하고자 한다. 따라서 Fig. 13과 같은 실험 장치를 ANSYS사의 Geometric program을 이용하여 동일하게 3D 형상을 만들고 수소탱크 저장실 모델링과 같은 계산조건으로 도출한 시뮬레이션 결과와 Schefer, et al. (2007)의 실험 결과를 비교하여 CFD 기법의 적합성을 검증하였다.

Fig. 15는 Schefer, et al. (2007)의 논문에 나타난 실험 장치와 동일하게 만든 CFD Modeling이다. 가로 $0.25m$, 세로 $0.25m$, 높이 $3m$ 의 직사각형 형상에 상부 면은 opening 조건으로 하고 중앙에는 원기둥 형상의 직경 63.5 mm 의 튜브가 위치하고 그 가운데에서 수소누출 조건인 직경 $0.00191m$, 속도 $134m/s$ 를 적용하였다. 해석영역은 대기압($1atm$)하에 난류 모델은 Standard $k-\epsilon$ model과 SST model을 이용하여 그 결과를 비교하였다. 수소 누출영역의 수직단면적에서 수소 분포를 물분율 $0\sim 1$ 의 범위로 나타낸 것이다. 누출 영역에서 수소의 분포가 가장 크고 수소의 가벼운 특성 때문에 수직방향으로 확산되면서 농도가 낮아지는 것이 확인된다.

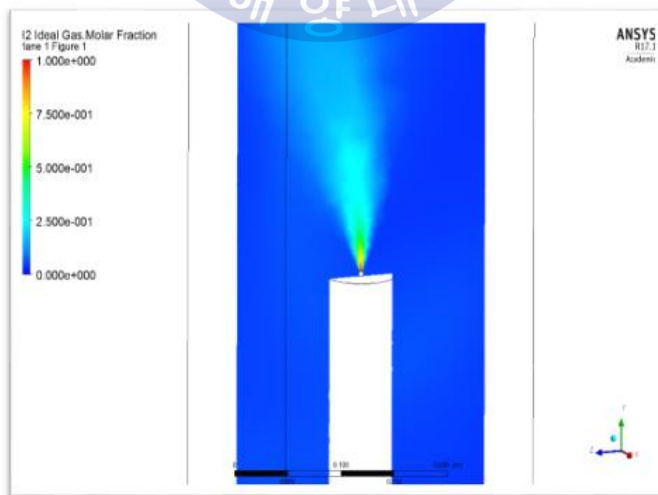


Fig. 15 CFD 적합성 검증을 위한 모델링

수소가스 누출 시, 분출 형상을 결정하는 무차원수인 밀도 프라우드 수 (Densimetric Froude number)는 정의에 따라 상온(20℃), 대기압(1atm)하의 공기의 밀도 $1.204\text{kg}/\text{m}^3$, 수소의 밀도 $0.08376\text{kg}/\text{m}^3$ 를 대입하면 식 (20)과 같이 계산되어 268이 된다.

$$Fr_{dens} = \frac{134 \text{ m/s}}{\sqrt{9.8\text{m/s}^2 \times 0.00191\text{m} \times \left(\frac{1.204 - 0.08376}{0.08376}\right)}} = 268 \quad (20)$$

Fig. 16은 Sandia National Laboratories에서 Schefer, et al. (2007)에 의해 실험한 결과와 본 연구에서 수소누출에 관한 CFD 기법의 적합성 검토를 위해 만든 모델링과의 결과를 비교한 것이다. Z는 수소 누출 영역에서 수직 방향의 거리 (m), D는 수소 누출 직경 0.00191m , X_{cl} 은 H_2 Molar Fraction을 나타낸다. Standard $k-\epsilon$ model과 SST model 모두 실험결과와 유사한 경향을 보여주고 있으나 정량적으로 Standard $k-\epsilon$ model이 더 잘 일치함으로 본 연구에서는 Standard $k-\epsilon$ model을 사용하여 수치해석을 진행하였다.

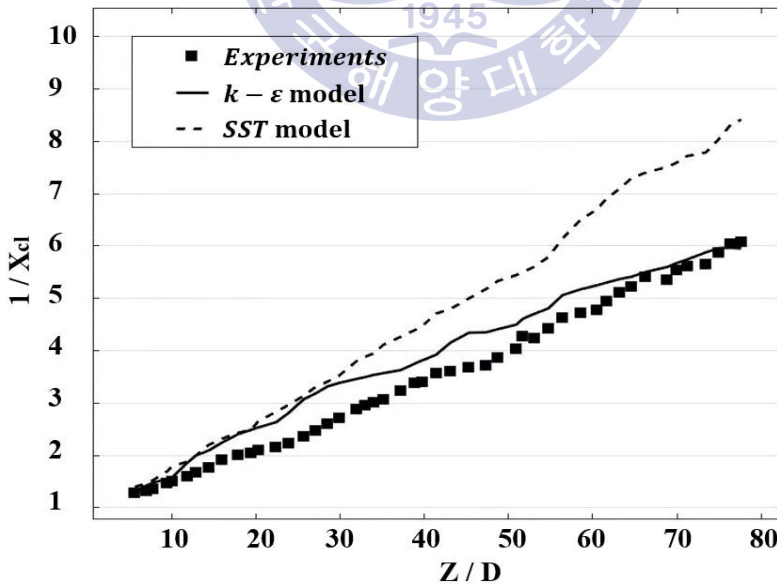


Fig. 16 실험과 CFD Modeling의 결과 비교

2.7. 수소탱크 저장실 모델링의 경계조건

수소 누출을 고려하기 위해 Fig. 17과 같이 탱크 표면에 총 5개의 임의의 누출위치를 대표하는 수소누출 영역을 지정하였다. 탱크의 상부, 하부, 앞, 뒤 그리고 측면이다. 수소누출 경계조건은 2.6장에서 수소누출의 CFD 기법의 적합성을 확인한 조건을 동일하게 적용하였다. 급기구와 배기구의 설정은 Fig. 18과 같이 수소탱크 저장실의 외벽에 가로 0.15m, 세로 0.15m의 정사각형 모양의 구획을 나누어 연구자의 의도에 따라 변경이 가능하도록 하였다. 통풍장치에 관한 규정에 따라 배기식 통풍을 모사하기 위해 배기구 영역에는 속도 조건을 주어 저장실 내의 유체가 배출되도록 하고 급기구는 압력 조건으로 창문이 열린 것과 같은 효과를 주었다. 통풍용량은 식 (21)과 같이 1시간에 수소탱크 저장실의 체적의 30회 공기 교환이 가능한 용량을 계산하여 속도 조건을 설정하였다.

$$Q_{vent} = 30 V_{room} / H \quad [m^3/hr] \quad (21)$$

여기서, Q_{vent} 는 통풍용량, V_{room} 는 수소탱크 저장실의 체적($1.0115m^3$), H 는 시간을 나타내며 수소탱크 저장실의 체적을 고려한 최소 통풍용량은 $30.345m^3/hr$ 이다. 배기구의 면적이 가로 0.15m, 세로 0.15m 임을 고려하면 배기구 영역에서 속도는 식 (22)과 같이 나타낼 수 있다. $1348.6[m/hr]$ 값을 $[m/s]$ 로 환산하면 $0.38[m/s]$ 가 된다.

$$V_{outlet\ velocity} [m/hr] = \frac{Q_{vent} [m^3/hr]}{A_{outlet} [m^2]} = \frac{30.345 [m^3/hr]}{0.0225 [m^2]} = 1348.6 [m/hr] \quad (22)$$

Table 10은 CFD의 계산조건을 나타내며 계산은 시작은 수소가 누출되는 시점부터로 설정하고 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 물분율이 일정해지는 때를 정상상태로 간주하여 계산을 종료하였다.

Table 10 Calculation conditions of CFD modeling

Boundary conditions	
Air intake	Relative pressure (0 Pa)
Hydrogen leak point	Velocity inlet (134 m/s)
Vent	Velocity outlet (0.76 m/s)
Wall	No slip condition
Computational conditions	
Fluid	Air at STP, H ₂ at STP
Turbulence model	Standard $k-\epsilon$ model
Simulation type	Transient analysis
Heat transfer	Isothermal (25°C)
Advection scheme	High resolution

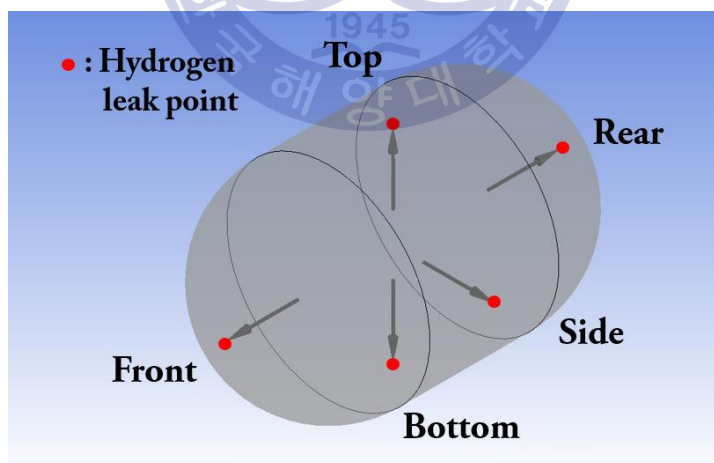


Fig. 17 임의의 수소가스 누출위치

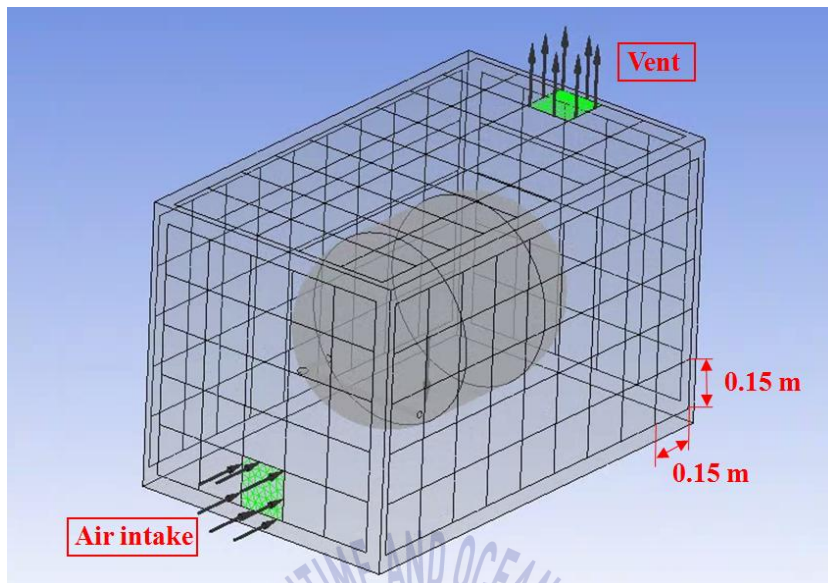


Fig. 18 급.배기구 위치 설정



2.8. 격자수 의존성 검토

해석 영역을 유한하게 제한하기 위해서 격자 작업이 필요하다. 격자 구성을 위해 ANSYS Meshing 프로그램을 이용하였다. 본 연구에서는 Tetrahedral Type과 Prism 격자를 사용하여 벽면근처에 조밀한 격자를 생성하였다. 격자의 신뢰도 검증을 위해서 격자 의존도 테스트를 수행하였다. Fig. 18과 같은 급배기구 위치조건과 배기구 영역에는 최소통풍용량의 2배인 $0.76[m/s]$ 의 속도조건을 적용하였다. Fig. 19는 수소가스 누출 후, 정상 상태에서 저장실 내부에 형성되는 기류의 평균속도를 격자수에 따라 나타낸 것이다. 그 결과 370,000개의 격자수 이상에서 속도의 차이가 크게 없는 것으로 나타났다. 따라서 다른 모든 조건에서 370,000개를 기준으로 계산을 수행하였다. Fig. 20은 수소누출영역의 수직단면에서 mesh를 나타낸 것이다.

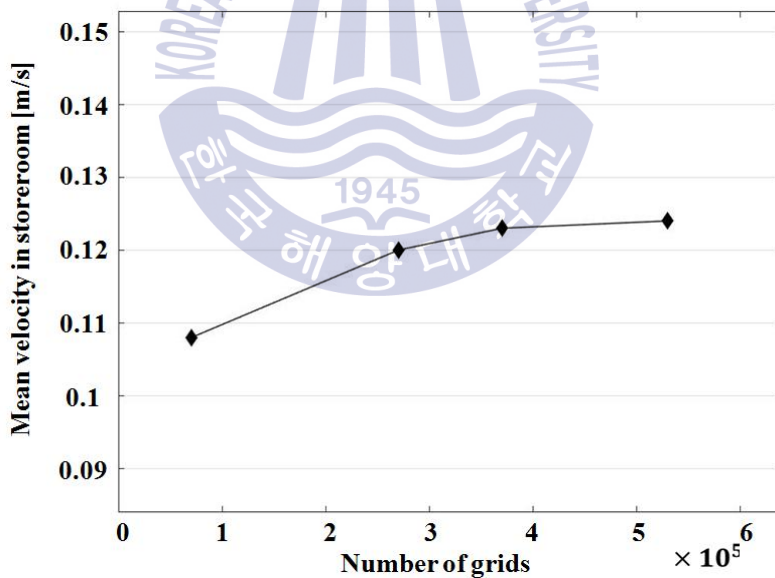


Fig. 19 격자수에 따른 저장실 내의 평균속도

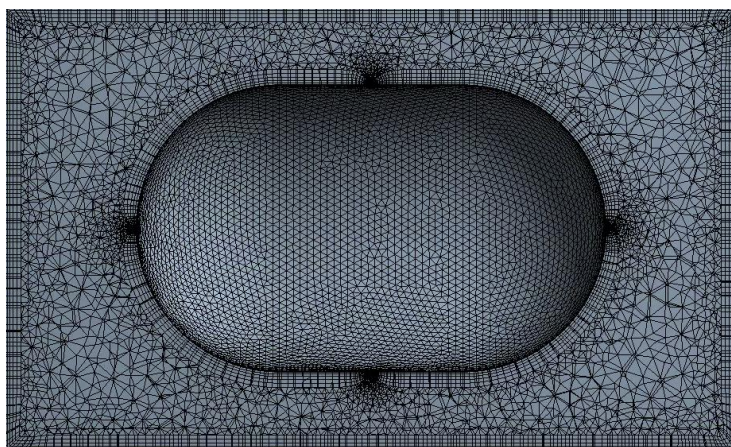


Fig. 20 CFD Modeling의 mesh 단면



3. 해석 결과

3.1. 통풍용량에 따른 결과

앞서 밝힌 바와 같이 수소탱크 저장실에 적용 가능한 배기식 통풍장치를 모사하기 위해서 속도를 이용하여 배기구 영역에 경계조건을 설정하였다. $0.38[m/s]$ 는 1시간에 수소탱크 저장실 체적의 30회 공기 교환이 가능한 조건이다. Table 11은 배기구 영역에서 속도에 따른 통풍용량을 나타낸 것이다. 이 장에서는 탱크의 Front 위치에서 수소가스 누출이 발생했을 때, 저장실의 급기구와 배기구의 위치를 Fig. 18과 같이 고정시키고 단지 통풍용량의 증가에 따른 결과를 분석하였다.

Table 11 Ventilation capacity according to outlet velocity

Outlet velocity	Ventilation capacity
$0.38[m/s]$	$Q_{vent} = 30 V_{room}/H [m^3/hr]$
$0.76[m/s]$	$2Q_{vent} = 60 V_{room}/H [m^3/hr]$
$1.14[m/s]$	$3Q_{vent} = 90 V_{room}/H [m^3/hr]$

3.1.1. 통풍용량에 따른 수소농도

Fig. 21은 통풍용량을 증가하면서 시간 경과에 따른 수소탱크 저장실 내부의 잔존하는 누출수소의 평균 몰분율을 나타낸 것이다. 초기 조건은 저장실 내의 수소가 없는 것이 설정되어 누출과 동시에 수소의 몰분율은 0 부터 증가하게 된다. 시간이 경과함에 따라 저장실 내의 몰분율의 값은 일정해지고 정상상태에 도달하게 되며 배기 속도가 $0.38[m/s]$ 의 경우에는 약 150초 이후에 정상 상태에 도달하지만 $0.76[m/s]$ 과 $1.14[m/s]$ 의 경우에는 그보다 더 빠른 약 50초 이후에 정상 상태에 도달하는 것을 알 수 있다. $0.38[m/s]$ 의 경우에 정상상태에서 수소탱크 저장실 내의 잔존하는 수소 몰분율은 0.17이다. 그리고 $0.76[m/s]$ 의 경우에 수소 몰분율은 0.1로써 통풍용량을 최소 용량에서 2배 증가하였을 때 약 55% 가량 잔존하는 누출수소가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 $1.14[m/s]$ 의 경우에는 저장실 내

수소의 물분율은 0.009로써 통풍용량을 최소 규정의 2배에서 3배로 증가 하였을 때, 약 10% 정도 저장실 내의 수소농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 저장실의 벽면과 내부에 배치된 수소탱크와의 공기저항이 통풍용량의 증가에 따라 선형적으로 증가되지 않기 때문으로 생각된다. 실제로 통풍용량의 증가는 소비전력의 증가와 관계되므로 저장실 내의 구조를 고려하여 적절한 통풍용량을 결정해야 한다. 본 연구에서는 통풍용량 최소규정의 2 배 조건인 $0.76[m/s]$ 가 본 해석대상의 범위 내에서 적절하다고 판단되어 이후의 모든 계산에 이를 적용하였다.

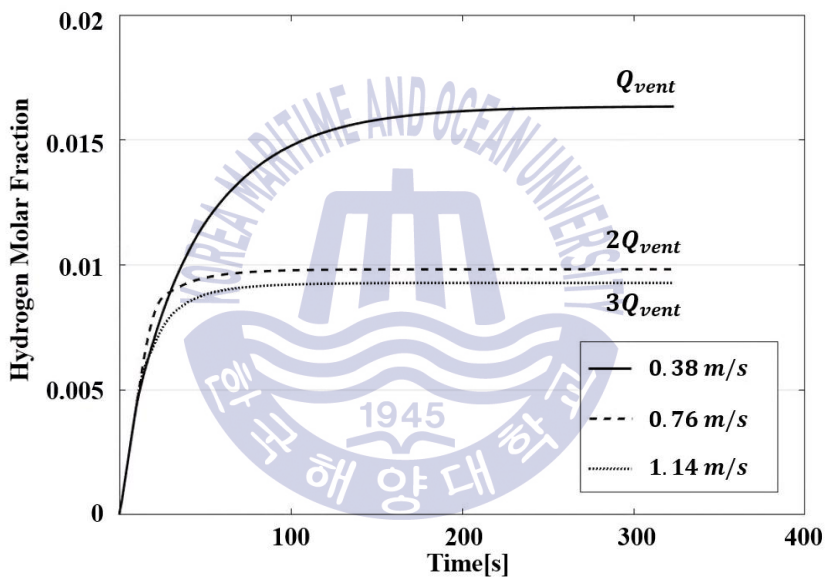


Fig. 21 통풍용량에 따른 저장실 내의 수소 평균 물분율

Fig. 22는 통풍용량 증가에 따른 수소탱크 저장실 내의 잔존하는 누출수소를 Volume Rendering 기능을 이용하여 물분율 0~0.04의 범위로 나타낸 것이다. 공통적으로 보이는 특징은 수소의 가벼운 특성 때문에 누출수소가 수소탱크 저장실 상부에 집적되는 것이다. 그림으로 보아 배기구의 속도가 $0.38[m/s]$ 의 경우에는 다른 두개의 경우보다 상부의 적체되는 수소의 농도가 크다는 것을 알 수 있다. $0.76[m/s]$ 와 $1.14[m/s]$ 의 경우에는 농도분포에 큰 차이가 없다.

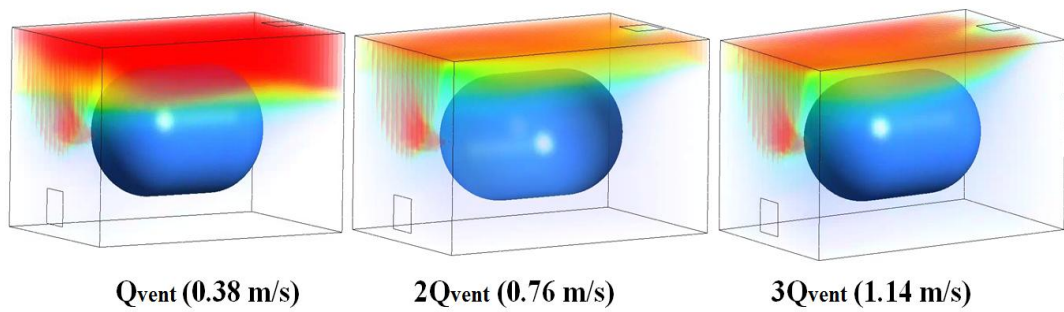


Fig. 22 통풍용량에 따른 저장실 내의 누출수소 농도분포



3.1.2. 통풍용량에 따른 속도분포

Fig. 23은 통풍용량 증가에 따른 수소누출영역의 수직단면에서 속도분포를 0~1 m/s의 범위로 나타낸 것이다. 뚜렷이 보이는 특징은 탱크 하부에 위치한 급기구로부터 유입되는 공기의 속도가 통풍용량의 증가에 따라 커지는 것이다. 배기속도 $0.38[m/s]$ 에서는 탱크의 하부측으로 유입되는 공기가 우측 벽면을 따라 상승하다가 배기구까지 원활하게 유동장이 형성되지 못하는 것을 알 수 있다. 또한 저장실의 상부 영역을 살펴보면 통풍용량이 증가함에 따라 천장면을 따라 우측에 위치한 배기구로 형성되는 속도가 증가함을 할 수 있다. 따라서 수소가스의 가벼운 특성상 상부공간에 집적되는 누출수소는 통풍용량의 증가에 따라 원활하게 배출 될 것으로 판단된다. $0.76[m/s]$ 와 $1.14[m/s]$ 의 조건에서는 저장실 내의 속도분포는 큰 차이를 보이지 않는다.



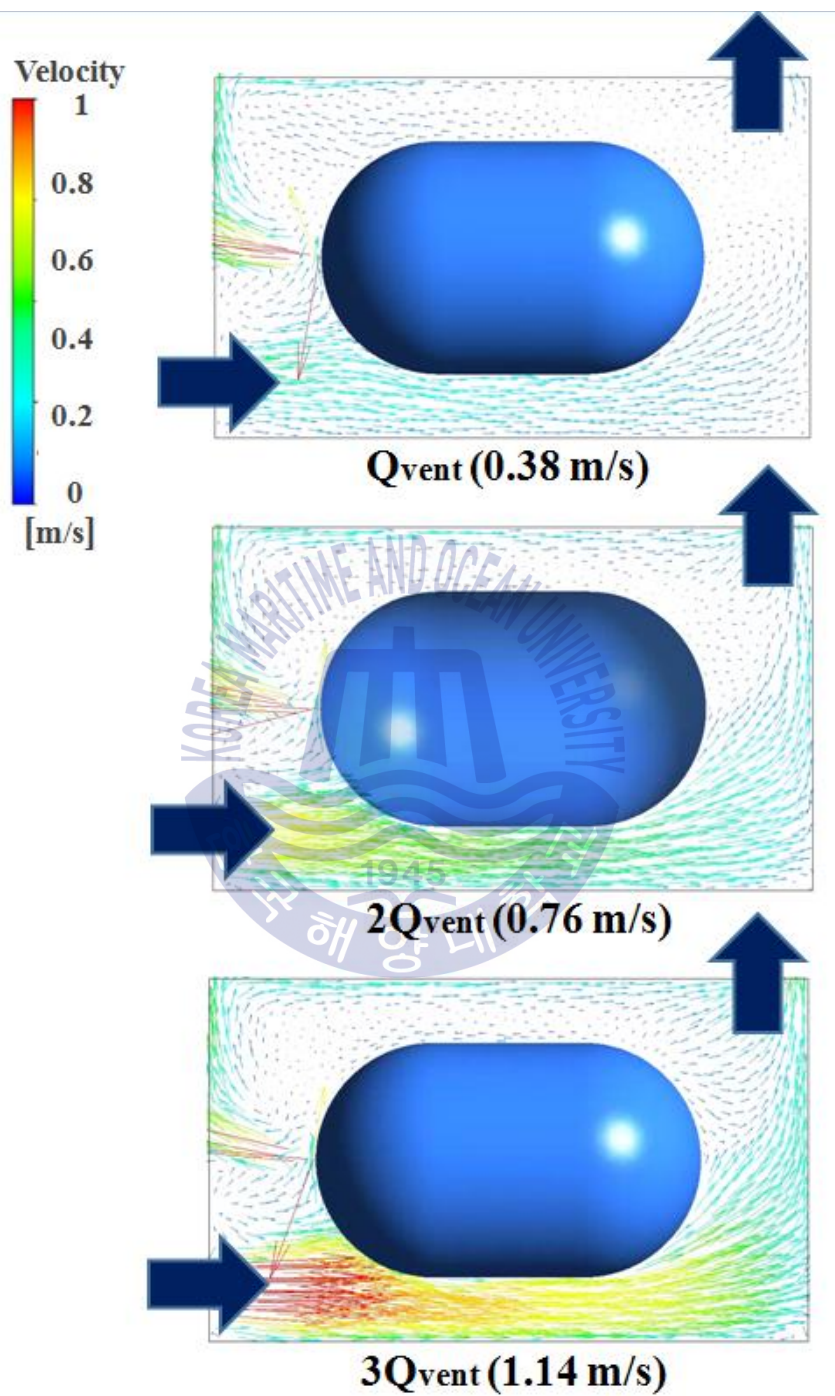


Fig. 23 통풍용량에 따른 저장실 수직단면의 속도분포

3.2. 배기구 위치 및 크기 변화에 따른 결과

앞서 밝힌 바와 같이 배기구 영역에 $0.76[m/s]$ 의 속도조건을 적용하여 계산을 수행하였다. Fig. 24는 급기구가 수소탱크 저장실 측면의 하부에 위치 할 때, 배기구의 위치 변화를 나타낸 것이다. Vent-1~10까지 총 10가지의 위치조건을 설정하였고 각각의 배기구의 위치에서 Fig. 17에 나타난 수소탱크 표면의 5 곳 수소누출 위치에 따른 계산을 수행하였다. Vent-9를 제외한 Vent-1~10은 $0.76[m/s]$ 의 배기속도가 적용되었다. Vent-9는 $0.38[m/s]$ 의 속도가 적용되는 반면, 배기구를 2개소로 분할하여 배치한 멀티배기구의 경우이다. 즉 2개소의 배기구에서 각각의 통풍용량을 싱글배기구의 1/2로 설정하여 총 통풍용량은 같게 하고 단지 분할 배치에 따른 결과를 비교하였다. Table 12는 정상상태에서 수소가스 누출 위치와 배기구 위치에 따라 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 물분율을 나타낸 것이다.

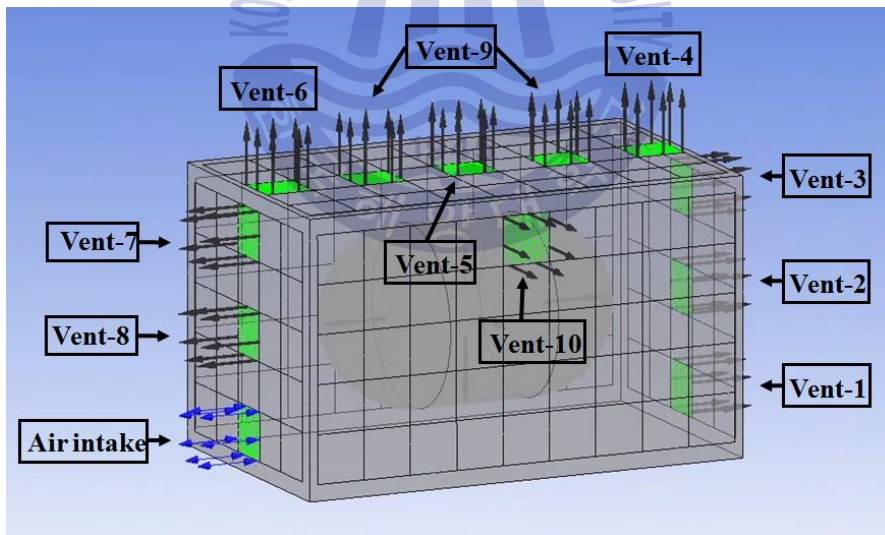


Fig. 24 고정된 급기구 조건에서 배기구의 위치 변화

Table 12 Hydrogen molar fraction(Vent-1~10) according to leakage and ventilation position

Vent position	Hydrogen gas leakage point					Average	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear	Side		
Vent-1	0.1022	0.0096	0.1088	0.0961	0.1015	0.0836	0.0416
Vent-2	0.0914	0.0165	0.0371	0.0024	0.0379	0.0371	0.0338
Vent-3	0.0119	0.0168	0.0114	0.0085	0.0129	0.0123	0.0030
Vent-4	0.0097	0.0189	0.0092	0.0102	0.0109	0.0118	0.0040
Vent-5	0.0001	0.0189	0.0072	0.0109	0.0075	0.0089	0.0068
Vent-6	0.0062	0.0186	0.0048	0.0104	0.0083	0.0097	0.0054
Vent-7	0.0084	0.0188	0.0022	0.0112	0.0095	0.0100	0.0060
Vent-8	0.0622	0.0193	0.0002	0.0233	0.0276	0.0265	0.0225
Vent-9	0.0051	0.0186	0.0067	0.0098	0.0075	0.0095	0.0053
Vent-10	0.0106	0.0214	0.0105	0.0109		0.0134	0.0053

3.2.1. 배기구 높이에 따른 수소농도

Fig. 24에서 Vent-1~4의 배기구 위치를 살펴보면 Vent-1은 수소탱크 저장실의 가장 하부측에 배치되어 있고 Vent-4는 가장 상부측에 배치되어 있다. 이 4가지의 경우를 비교하여 배기구의 높이 변화의 따른 수소탱크 저장실 내부의 유동 특성을 확인하였다. Fig. 25는 Table 12의 데이터를 바탕으로 각 배기구 위치에서 얻어진 물분율의 평균값과 그 표준편차를 함께 나타낸 것이다. 그래프를 살펴보면 Vent-3과 Vent-4는 수치상 큰 차이를 나타내지 않는다. 이것은 탱크 측벽의 상부와 천장에 배치된 배기구 위치에 따른 결과가 큰 차이가 없음을 나타낸다.

Vent-4를 제외한 배기구의 위치에서 결과를 비교하면, 누출수소의 물분율이 큰 차이를 보인다. 가장 낮은 높이에 배기구가 위치한 Vent-1에서 수소의 평균 물분율이 0.0836으로 가장 크게 나타난다. 수직 방향의 중앙에 배기구가 위치한 Vent-2에서는 수소의 물분율이 0.0371로 Vent-1에 비하여 약 55% 가량 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Vent-3의 조건에서는 Vent-2에 비하여 약 60% 가량 감소한다. 이를 통해 배기구 높이 증가에 따라 누출수소의 배출이 원활하게 됨을 알 수 있다. 표준편차를 살펴보면, Vent-1의 조건에서는 0.0416을 나타내고 Vent-2에서는 0.0338로 Vent-3과 Vent-4에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 표준편차란 수치들의 산포도를 나타내며, 이것이 본 연구에서 의미하는 것은 5 곳의 수소누출 위치에서 계산된 잔존하는 누출수소의 물분율이 평균과 얼마나 큰 차이를 보이는 가이다. 즉 표준편차의 값이 작다는 것은 5 곳의 수소누출 위치 어디에서나 계산결과 비슷한 값의 수소 물분율을 나온다는 것이고, 반면 표준편차의 값이 크다는 것은 특정 수소누출 위치에서 잔존하는 누출수소의 물분율이 상대적으로 크거나 작은 값이 존재함을 나타내는 것이다. 따라서 Fig. 25에서 표준편차가 큰 값을 가지는 Vent-1과 Vent-2의 배기구 조건은 누출수소의 안정적인 배출이라는 측면에서 합당한 위치가 아니라고 생각된다.

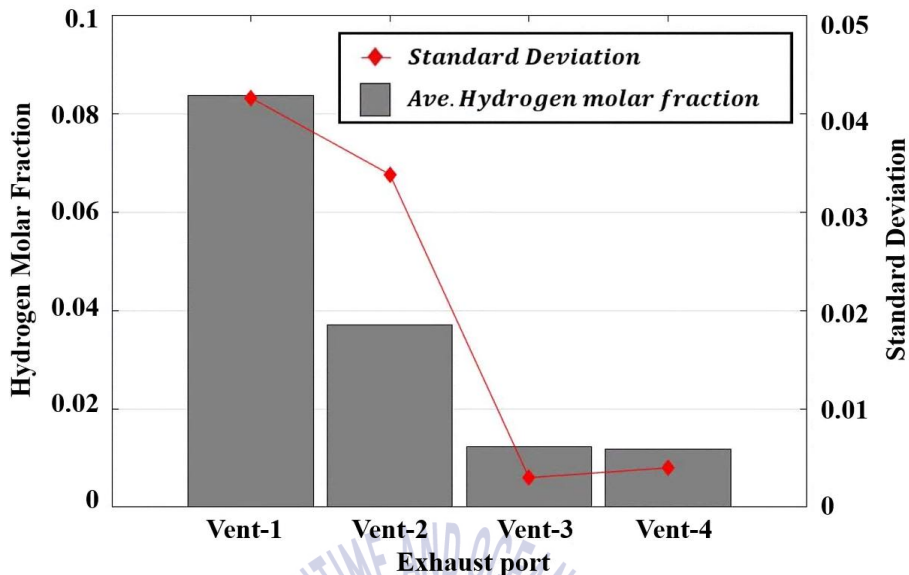


Fig. 25 배기구 높이에 따른 평균 수소몰분율과 표준편차

배기구의 높이 변화에 따른 수소탱크 저장실 내의 수소농도를 가시화 하면 상부에 집적되는 수소가스를 확인 할 수 있다. Fig. 26은 탱크의 Top 위치에서 수소가스 누출이 발생했을 때, 각각 Vent 1-3의 조건에 따른 수직단면에서 누출수소의 농도분포와 급기구로부터의 유입되는 공기의 유선을 나타낸 것이다. 유입공기의 유선을 살펴보면 Vent-1의 경우에는 하부측에 위치한 급기구로부터 유입되는 공기가 저장실 내부를 순환하지 않고 반대편 벽면에 마주보게 위치한 배기구로 즉각적으로 배출되는 것이 확인 된다. 기류의 속도는 Vent-2와 Vent-3에 비하여 상대적으로 높으며 이것은 Vent-2와 Vent-3의 배기구 조건에서는 급기구로부터 유입된 공기가 탱크와의 저항으로 운동에너지가 감소하면서 배기구로 이동하기 때문이다. 유선을 통해 배기구의 위치가 상부측으로 올라갈수록 유입공기가 수소탱크 저장실 내의 많은 공간을 순환하면서 배출되는 것을 알 수 있다. 즉 유입공기의 순환의 관점에서 그리고 수소의 가벼운 특성을 고려했을 때, 수직 방향에서 상부측에 배기구를 설치하는 것이 합당하다고 판단된다. 수직단면적에서의 수소농도분포를 살펴보면, Vent-1의 경우 누출수소는 저장실 내 상부측에 집적되어 원활히 배출되지 않는다. Vent-2에서도 마찬가지로

상부측에 누출수소가 집적되는데 공통적으로 보이는 특징은 배기구가 위치한 높이 이상부터 누출수소의 농도가 높게 나타나는 것이다. 이를 통해 통풍용량 뿐만 아니라 같은 통풍용량이라도 배기구의 설치높이에 따라 누출수소의 효율적인 배출에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



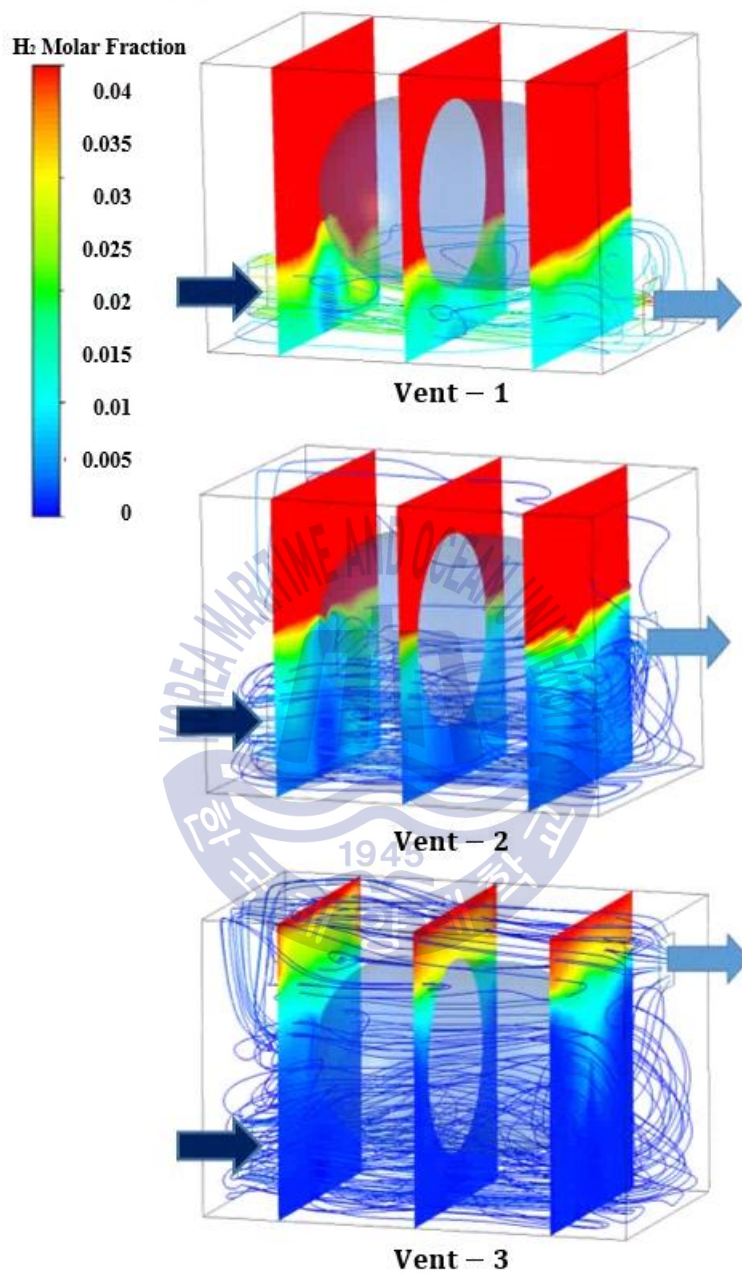


Fig. 26 배기구 높이에 따른 수소 농도분포와 유선도

3.2.2. 배기구의 설치 측벽에 따른 수소농도

앞서 밝힌 바와 같이 저장실의 수직 방향에서 배기구가 상부측에 위치하는 것이 누출수소의 배출 관점에서 효율적인 것을 알았다. 이 장에서는 같은 높이에 배기구가 위치한 상태에서 Fig. 27과 같이 급기구와 같은 측벽의 위치한 배기구인 Vent-7, Vent-8과 급기구와 반대편 측벽의 위치한 배기구인 Vent-2와 Vent-3에서의 계산결과를 비교하고자 한다.

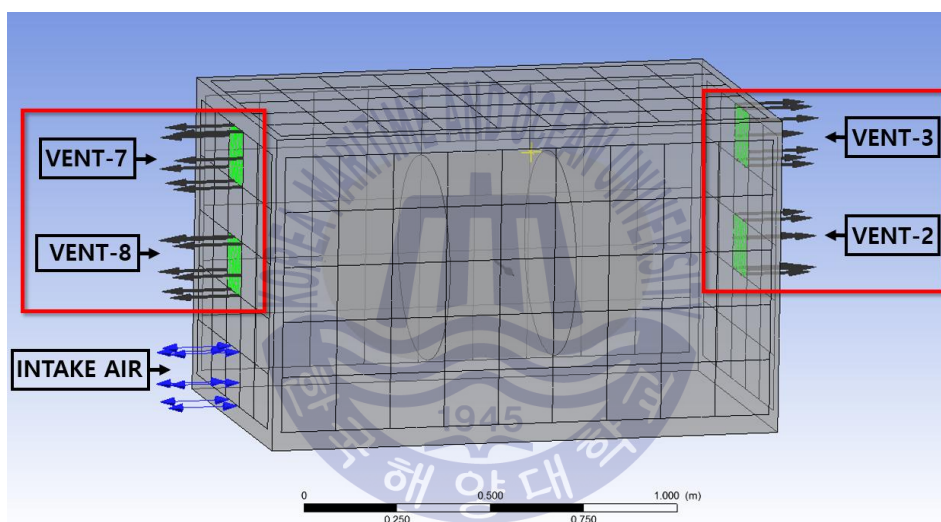


Fig. 27 설치 측벽에 따른 배기구의 배치

Fig. 28은 Table 12의 데이터를 바탕으로 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균 물분율과 그 표준편차를 배기구의 위치에 따라 나타낸 것이다. 같은 높이상에 위치한 Vent-2와 Vent-8을 비교하면 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균 물분율은 Vent-2에서 0.0338이고 Vent-8은 0.0225이다. 즉 Vent-8에서 약 30% 정도 누출수소 배출이 더 효율적임을 알 수 있다. 표준편차 또한 Vent-8이 Vent-2에 비해 상대적으로 낮게 나타남으로, 이를 통해 급기구와 같은 측벽에 위치한 배기구에서 더욱 안정적으로 누출수소가 배출됨을 알 수 있다. Vent-3과 Vent-7의 비교하면, 역시

급기구와 같은 측벽에 위치한 Vent-7의 경우에 저장실 내에 잔존하는 누출수소의
 몰분율이 다소 낮게 나타났다. 그 이유는 저장실 내의 형성되는 속도분포를 통해 확인
 할 수 있다.

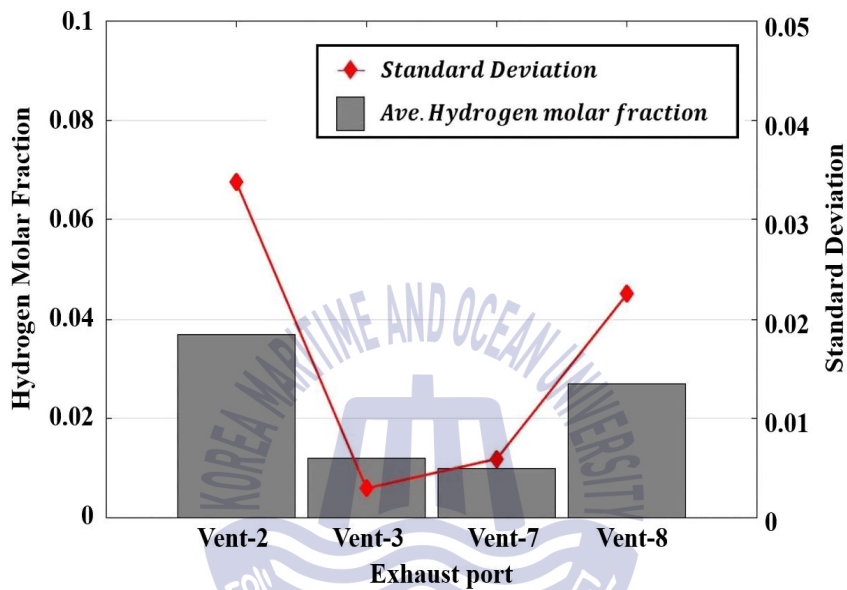


Fig. 28 배기구 설치 측벽에 따른 평균 수소몰분율과 표준편차

3.2.3. 배기구의 설치 측벽에 따른 속도분포

Table 13은 수소가스 누출위치와 배기구 조건에 따른 저장실 내, 기류의 평균속도를 나타낸 것이다. Vent-2와 Vent-3에 비하여 급기구와 같은 측벽에 위치한 Vent-7과 Vent-8의 경우에 평균속도가 다소 높게 나타난다. 이를 바탕으로 Fig. 29는 배기구 위치에 따른 수소가스 누출영역의 수직단면에서 속도분포를 0~2 m/s 범위로 나타낸 것이다. 공통적으로 보이는 특징은 급기구를 통해 유입된 공기가 탱크 하부를 지나 수소탱크 저장실 내를 반시계방향으로 흐르는 기류이다. Vent-7과 Vent-8에서는 탱크의 하부측으로 유입된 공기가 우측 벽을 타고 이동하여 탱크의 상부측으로 일정 속도를 유지하면서 배기구를 통해 배출된다. 이것으로 탱크 상부에 집적되는 수소가 유입공기의 흐름에 따라서 배기구로 원활히 배출될 것으로 생각된다. 그러나 Vent-2와 Vent-3에서는 Vent-7과 Vent-8에 비하여 탱크의 상부측의 형성되는 기류의 속도가 다소 낮음을 알 수 있다. 이것은 유입된 공기가 우측 벽면을 타고 상부공간의 좌측으로 이동하는데 Vent-2와 Vent-3의 배기구는 기류 흐름과 반대되는 우측에 위치하였기 때문에 원활한 원형형태의 유동장이 형성되지 못하기 때문이다. 또한 Vent-2와 Vent-3에서는 배기구 주변에 와류 형성과 함께 속도가 감소되는 것이 확인된다. 누출수소의 효율적인 배출은 저장실 내의 형성되는 기류의 영향을 크게 받는다는 점을 감안한다면, 본 해석대상에서는 급기구와 같은 측벽에 위치한 배기구에서 더 효율적으로 누출수소를 배출한다는 것을 알 수 있다.

Table 13 Average velocity(Vent-2, 3, 7, 8) according to leakage and ventilation position

Vent position	Hydrogen gas leakage point					Average [m/s]
	Top	Bottom	Front	Rear	Side	
Vent-2	0.1002	0.1217	0.1144	0.1001	0.1039	0.108
Vent-3	0.1106	0.1282	0.1306	0.1154	0.1215	0.121
Vent-7	0.1232	0.1485	0.1301	0.1329	0.1275	0.132
Vent-8	0.1067	0.1454	0.1354	0.1189	0.1068	0.123



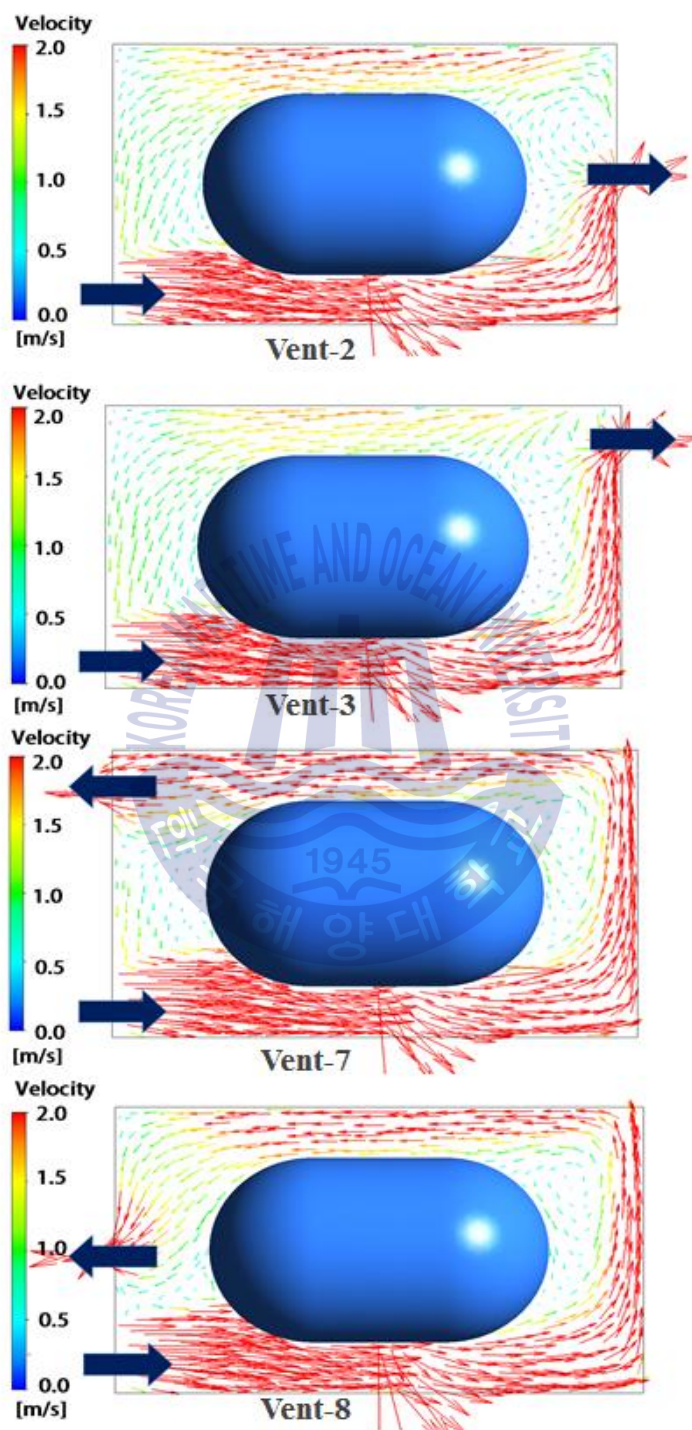


Fig. 29 배기구 설치 측벽에 따른 수직단면의 속도분포

3.2.4. 탱크의 영향이 작은 경우, 배기구의 설치 측벽에 따른 수소농도

Fig. 29와 같은 결과는 수소탱크 저장실 중앙에 위치한 탱크의 영향이 크다고 생각된다. 일반적으로 효율적인 환기는 급기구와 배기구의 거리가 멀어 유입된 신선한 공기가 저장실 내를 충분히 순환 후 배출되는 것인데 위의 결과는 급기구와 같은 측벽에 위치한 배기구, 즉 급기구와 배기구의 거리가 가까운 조건에서 누출수소의 배출이 더욱 원활하게 나타났다. 따라서 이 장에서는 탱크의 크기가 무시할 수 있을 만큼 대단히 작은 경우의 계산을 통해, 유동에 미치는 탱크의 영향을 확인하고자 한다.

Fig. 30은 수소탱크 저장실의 각 변의 길이는 기존의 형상보다 각 10배로 늘리고 탱크의 직경과 길이는 1/10로 줄인 수소탱크 저장실의 형상이다. 탱크의 Bottom과 Top의 위치에서 같은 조건으로 수소가스가 누출되었을 때 Vent-3과 Vent-7의 배기구 위치에서 잔존하는 누출수소의 물분율을 비교하였다. 수소탱크가 대단히 작기 때문에 탱크표면에 지정되는 임의의 수소누출 위치는 Bottom과 Top만으로도 충분히 비교 가능하다고 판단되어 누출위치 2 곳에서만 계산결과를 분석하였다.

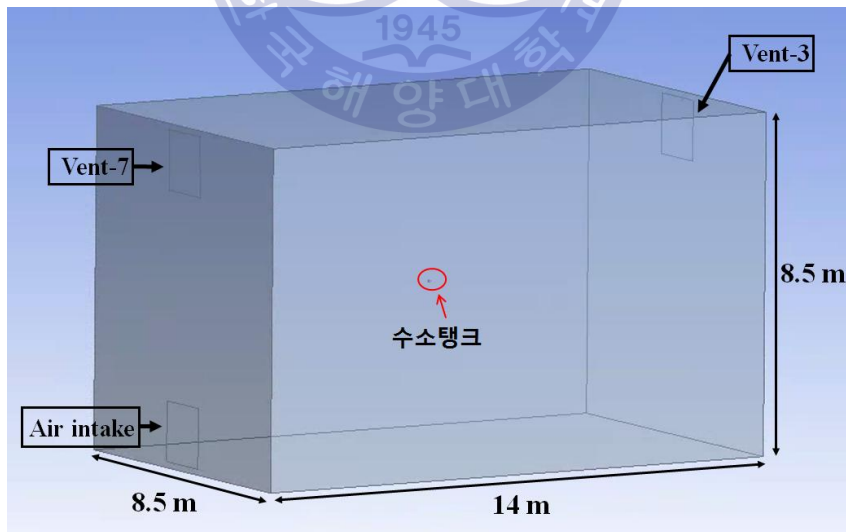


Fig. 30 탱크의 영향이 대단히 작은 저장실의 3D 형상

Table 14 Hydrogen molar fraction(Vent-3, 7) according to leakage and ventilation position

Vent position	Hydrogen gas leakage point		Average
	Bottom	Top	
Vent-3	0.00215	0.00242	0.00228
Vent-7	0.00275	0.00302	0.00288

Table 14는 정상상태에서 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 물분율을 나타낸다. 앞선 결과와는 다르게 탱크의 크기가 대단히 작을 때, 급기구와 반대편 측벽에 배기구가 위치한 Vent-3의 경우에서 잔존하는 누출수소의 물분율이 더 낮게 나타났다. **Fig. 31**은 수소 누출영역의 수직단면에서 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 물분율을 0~0.01의 범위로 나타낸 것이다. Vent-3의 경우에서 누출수소가 급기구와 반대편 측벽에 위치한 배기구로 단순한 형태로 배출되기 때문에 누출영역과 배기구 사이의 최단 거리 공간을 제외한 영역에서는 Vent-7의 조건과 비교하여 수소농도가 다소 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 Vent-7의 조건에서는 누출수소가 단순한 형태로서 배기구로 배출되지 않고 Vent-3에 비하여 상대적으로 많은 공간에 농도분포가 다소 넓게 나타난다. 이것은 **Fig. 32**에서 보여주는 수직단면적의 속도분포에 따른 결과로 생각되는데, 공통적으로 보이는 특징은 급기구로 유입되는 공기의 영향으로 반시계방향의 기류가 저장실 내에 형성되는 것이다. 이때 저장실의 벽면에서는 벽면을 따라 일정한 흐름을 보이지만 벽면과 떨어진 저장실의 중앙에서 반시계방향과는 크게 관계없는 복잡한 유동장이 형성된다. 만약 탱크의 크기가 커서 저장실의 벽면과 탱크와의 간격이 좁다면 누출수소는 벽면을 따라 형성되는 반시계 방향의 기류의 영향을 크게 받아 신속하게 배출되겠지만, 아래와 같이 탱크의 크기가 상당히 작을 때는 벽면 이외의 영역에서 형성되는 중앙부분의 복잡한 기류의 영향을 받게 된다. Vent-3의 조건에서는 중앙부근의 기류가 저장실 내 하부측에 유입되는 공기흐름을 따라 우측으로 이동되지만 Vent-7에서는 좌측에 위치한 배기구 흡입력에 기인하여 중앙부근의 기류가 양방향으로 다소 분산되는 것을 볼 수 있다. 그로 인해

누출 수소의 농도분포가 한 방향으로 단순한 형태를 띠며 이동하지 않고 넓은 영역에 걸쳐 있는 것이다.

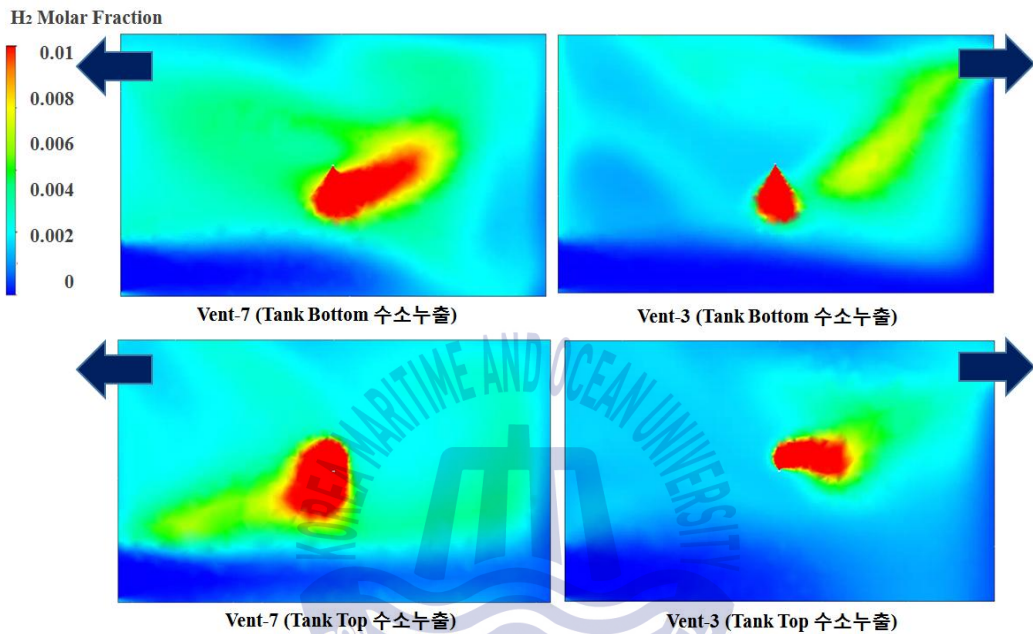


Fig. 31 탱크의 영향이 작은 경우 수직단면에서 수소 농도분포

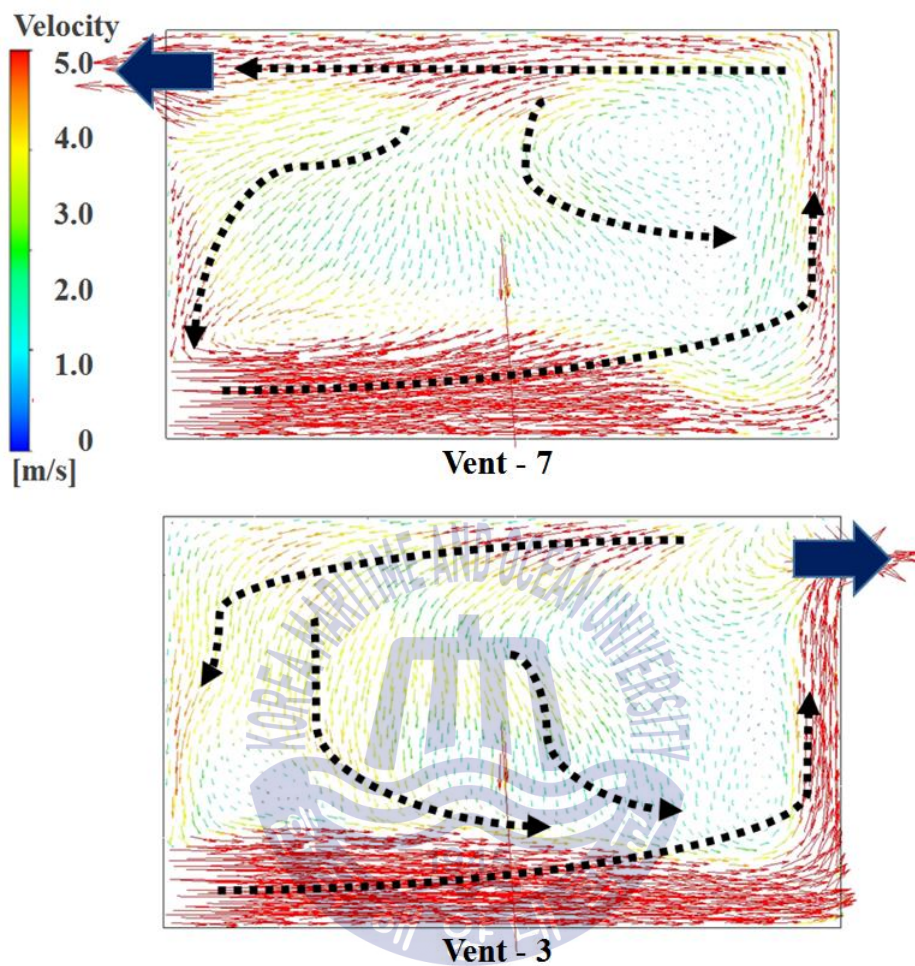


Fig. 32 탱크의 영향이 작은 경우 수직단면에서 수소 속도분포

3.2.5. 천장 배기구 위치에 따른 수소농도

Fig. 33과 같이 수소탱크 저장실의 천장면의 3개의 배기구 위치에 따른 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균농도와 표준편차를 비교하였다. Fig. 34는 Table 12의 데이터를 바탕으로 수소의 평균몰분율과 그 표준편차를 배기구의 위치에 따라 나타낸 것이다. Vent-5의 위치에서 잔존하는 누출수소의 몰분율 가장 낮고 그 표준편차는 가장 높다. 그 이유는 Table 12에서 알 수 있듯이, Vent-5 조건의 배기구 위치에서 탱크표면의 Top에서 수소가 누출 할 때, 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 몰분율이 0.001로서 거의 없기 때문이다. 이것은 배기구와 수소누출 위치가 비정상적으로 가깝기 때문에 누출수소가 저장실의 상부에 거의 집적되지 않고 즉각적으로 배출되기 때문이다. Fig. 35는 이 경우에서의 수소농도 분포를 나타내면, 본 장에서는 이 경우를 제외하고 결과를 비교하고자한다.

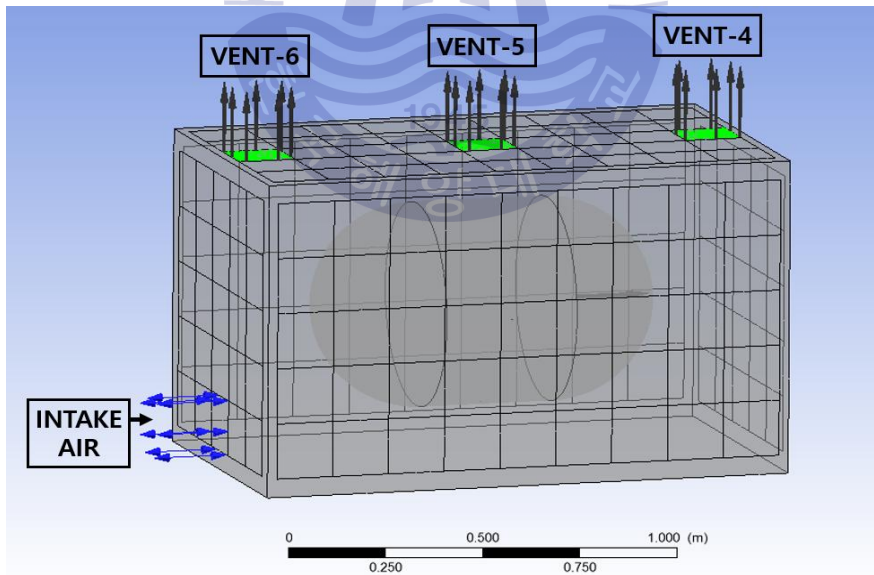


Fig. 33 천장면의 위치에 따른 배기구 배치

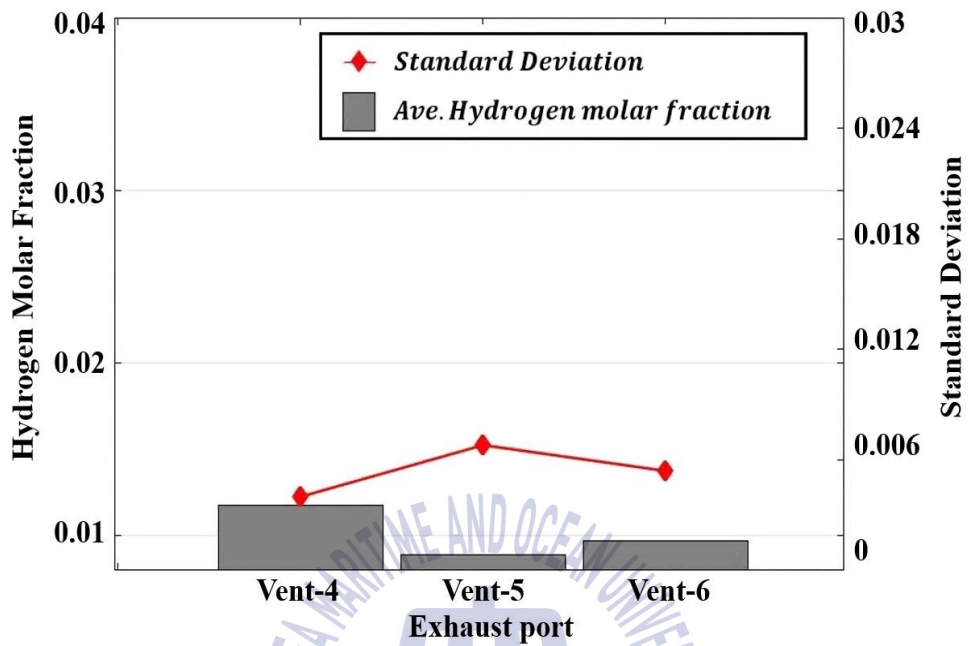


Fig. 34 천장면 배기구 위치에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차

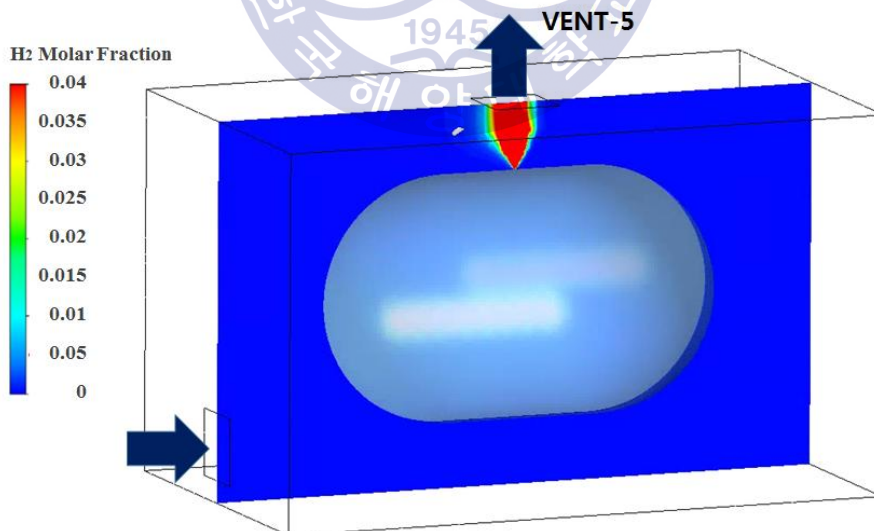


Fig. 35 탱크 Top의 수소누출과 Vent-5의 조건에서 수소농도 분포

Fig. 35와 같은 극단적인 경우를 제외하고 다른 4곳의 수소누출 위치에서 평균몰분율과 표준편차를 비교하면 Table 15와 같은 결과가 나오고 이를 그래프로 나타내면 Fig. 36과 같다. 앞서 같은 배기구 높이라면 급기구와 같은 측벽에 위치한 배기구가 누출수소를 더 효율적으로 배출하는 것을 확인했다. 천장면에서도 마찬가지로 급기구와 배기구 사이의 거리에 따라 즉, Vent-4, Vent-5, Vent-6 순서로 잔존하는 누출수소의 양이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 배기구 높이에 따른 결과와 비교할 때 미미하다. 따라서 만약 저장실 내의 수소의 누출 가능성이 높은 영역을 유추할 수만 있다면 그 곳의 수직방향 상부에 배기구를 설치하는 것을 검토해 볼 필요가 있다고 생각된다.

Table 15 Hydrogen molar fraction(Vent-4, 5, 6) according to leakage and ventilation position except for top direction leakage of tank

Vent position	Hydrogen gas leakage point					Average	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear	Side		
Vent-4		0.0189	0.0092	0.0102	0.0109	0.0123	0.0045
Vent-5		0.0189	0.0072	0.0109	0.0075	0.0111	0.0054
Vent-6		0.0186	0.0048	0.0104	0.0083	0.0105	0.0059

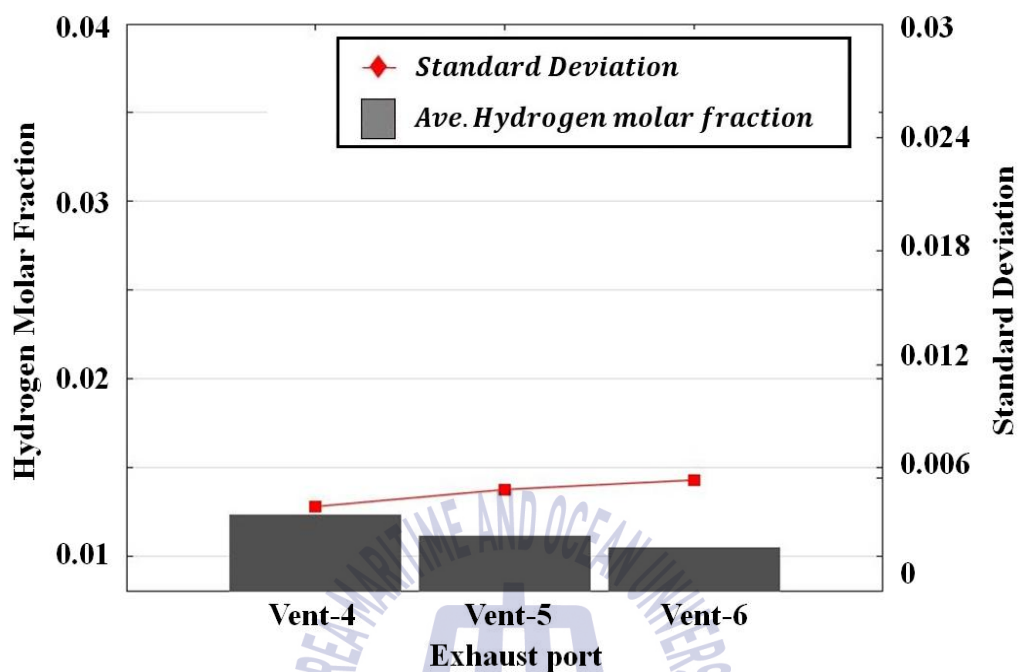


Fig. 36 탱크 Top 방향의 누출을 제외한 천장면 배기구 위치에 따른 수소
평균몰분율과 표준편차

3.2.6. 멀티 배기구에 따른 수소농도

앞서 천장면의 배기구 배치에서 수치적으로 Vent-5의 위치에서 수소 평균물분율이 가장 작게 나타남을 확인했다. $2Q_{vent}$ 의 통풍용량으로 싱글배기구에서 누출수소를 배출할 때와 이를 분할하여 Q_{vent} 의 통풍용량으로 Fig. 37과 같이 멀티 배기구를 이용하여 누출수소를 배출할 때를 비교하였다.

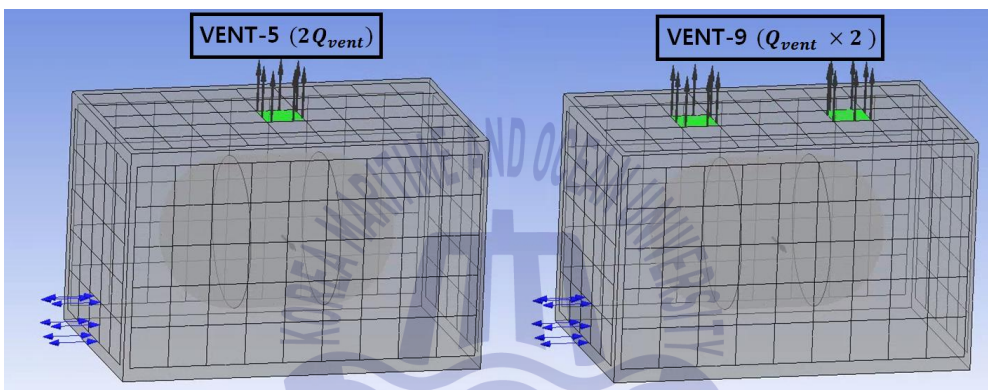


Fig. 37 천장면에 2개소 분할 배치된 멀티 배기구

Fig. 38은 멀티배기구의 경우에서 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균물분율을 누출위치에 따라 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 35와 같이 누출영역과 배기구의 거리가 비정상적으로 짧은 Vent-5의 탱크 Top에서 누출 되었을 경우를 제외하면 다른 누출 위치에서는 천장면에 멀티배기구를 배치하는 것이 5 % 정도 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 농도를 감소하는데 효과가 있다. Fig. 39는 Vent-5와 Vent-9에서의 누출수소를 수소물분율 0~0.04 범위로 Volume rendering 기능을 이용해 가시화한 것이다. Vent-9의 저장실의 상부측에서 가연 영역이 다소 감소 된 것이 확인 된다. 그러나 이 차이는 배기구 설치 높이에 의한 영향보다 상당히 미미하여 멀티배기구의 설치에 수반되는 작업의 어려움을 충분히 검토해 배기구 위치를 선정해야 할 것으로 판단된다.

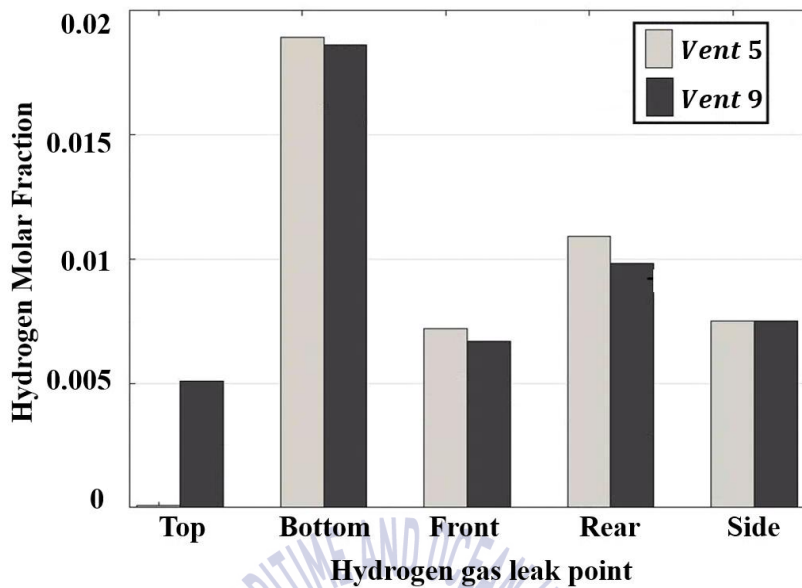


Fig. 38 멀티 배기구 조건에서 누출 영역에 따른 수소 평균몰분율

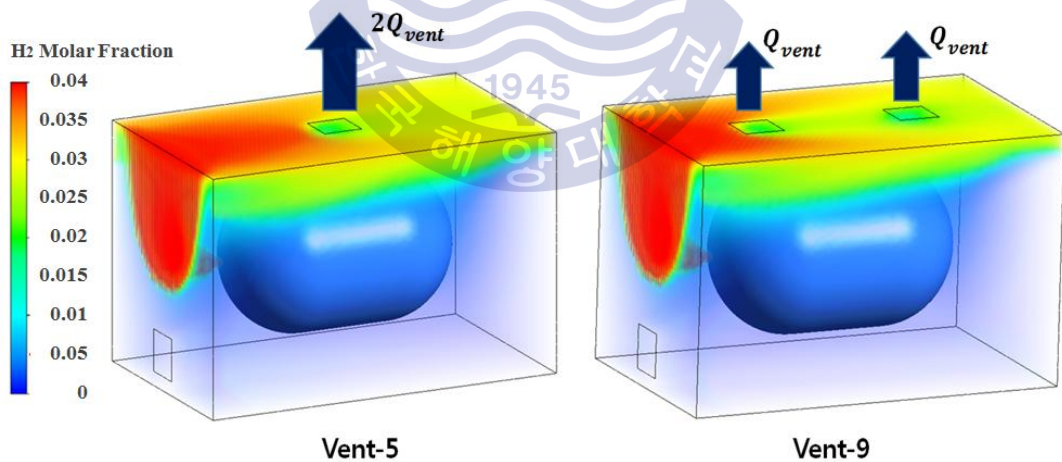


Fig. 39 멀티 배기구 조건에서 누출수소의 농도분포

3.2.7. 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 수소농도

Fig. 40은 같은 높이에서 배기구가 급기구와 같은 수직평면상이 아닌 다른 측면에 위치할 때의 유동 특성을 비교하고자 한 것이다. 초기설정에서 탱크의 수소누출 위치를 5 곳으로 정했지만 여기서는 Side 누출 위치를 제외하고 비교하였다. 그 이유는 탱크의 Side 위치는 배기구 Vent-10과 비대칭적으로 근접하기 때문에 Vent-7과 Vent-3을 함께 정량적으로 비교 할 수가 없기 때문이다.

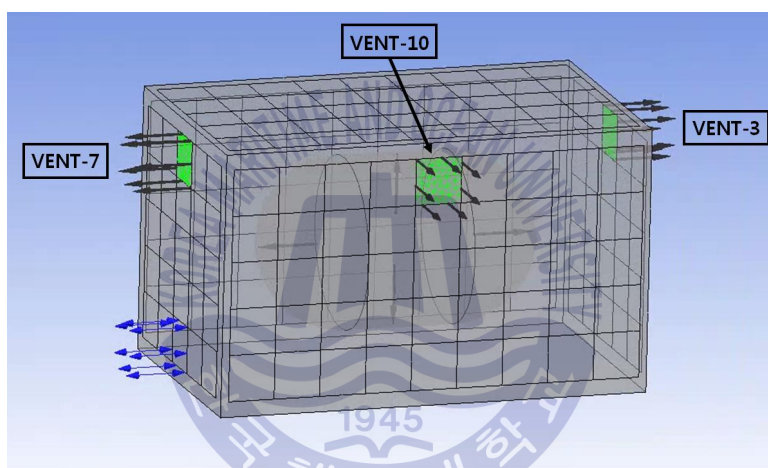


Fig. 40 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 비교

Table 16 Hydrogen molar fraction(Vent-3, 7, 10) according to leakage and ventilation position expect for top direction leakage

Vent position	Hydrogen gas leakage point				Molar Fraction	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear		
Vent-3	0.0119	0.0168	0.0114	0.0085	0.0122	0.0034
Vent-10	0.0106	0.0214	0.0105	0.0109	0.0134	0.0054
Vent-7	0.0084	0.0188	0.0022	0.0115	0.0102	0.0069

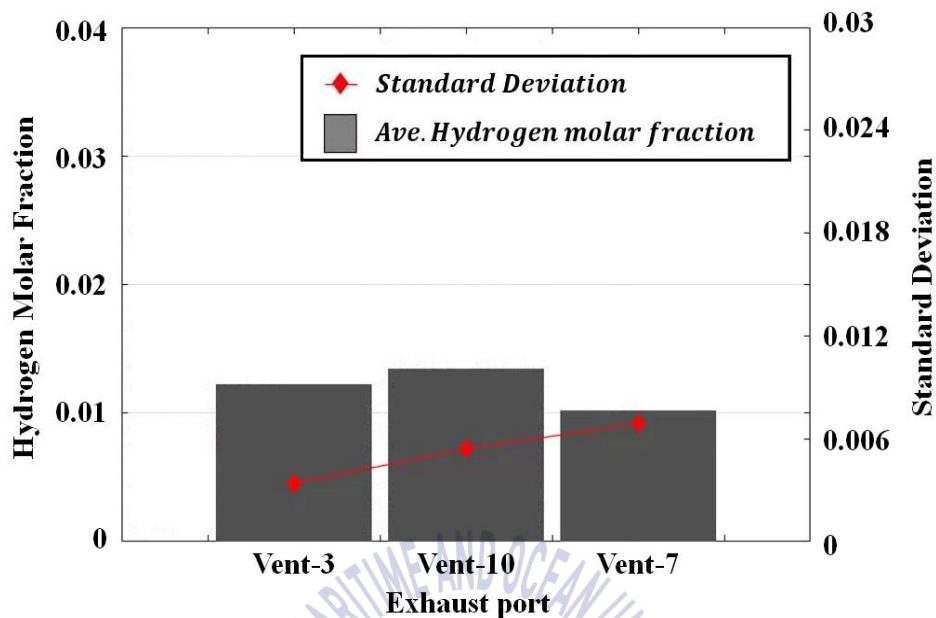


Fig. 41 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차

Fig. 41은 Table 16의 데이터를 바탕으로 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균 몰분율과 그 표준편차를 함께 나타낸 것이다. 평균 몰분율에이 Vent-10에서 다소 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 급기구와 배기구가 같은 수직평면 상에 위치하지 않아 유입공기의 기류가 복잡해진 것에 기인하여 그만큼 누출수소가 배기구로 배출되는 과정에서 저장실 내에 체류하는 시간이 길어졌기 때문이다. Fig. 42는 탱크의 누출 영역으로부터의 유선을 속도 0~1m/s의 범위로 나타낸다. Vent-3과 Vent-7에서는 급기구와 배기구가 같은 수직 평면상에 존재하기 때문에 누출수소의 흐름이 단순하다. 누출된 수소는 탱크 하부측의 기류를 타고 벽면으로 이동하면서 배기구를 통해 배출 되는 것이 확인된다. 그러나 Vent-10의 경우는 누출수소의 흐름이 Vent-3과 Vent-7에 비해 상대적으로 복잡하다. 이것으로 보아 같은 높이의 배기구가 설치된다면, 급기구와 같은 수직 평면상에 배치하는 것이 효율적인 누출수소의 배출 측면에서 유리하다고 판단된다.

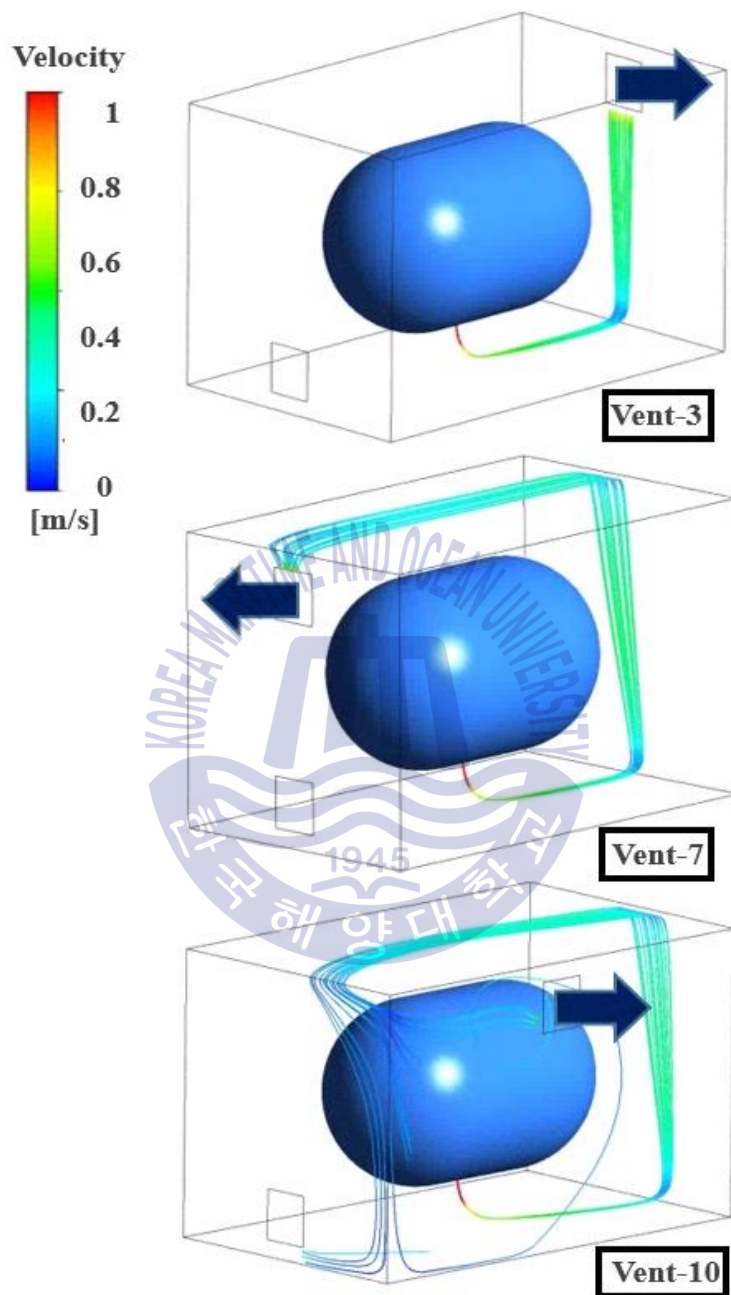


Fig. 42 동일 높이의 측면 배기구 배치에 따른 누출수소의 유선도

3.3. 급기구 위치 및 크기 변화에 따른 결과

3.3.1. 급기구 높이에 따른 수소농도

앞서 밝힌 바와 같이 Vent-9의 멀티배기구 조건에서 가장 효율적으로 누출수소가 배출되는 것을 확인하였다. Fig. 43은 배기구가 Vent-9의 위치에 고정되고 급기구가 수직 방향의 Intake-1, Intake-2, Intake-3으로 변경될 때, 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 물분율과 유동특성을 비교하기 위한 배치이다.

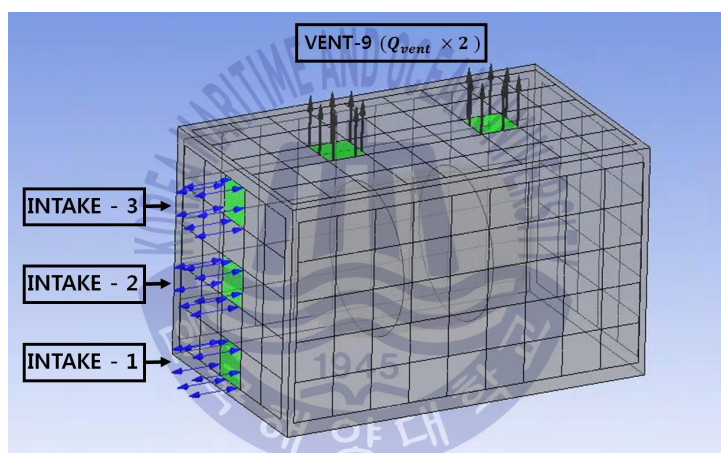


Fig. 43 급기구 높이에 따른 배치

Table 17 Hydrogen molar fraction(Intake-1, 2, 3) according to leakage and ventilation position

Intake position	Hydrogen gas leakage point					Average	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear	Side		
Intake-1	0.0051	0.0186	0.0067	0.0098	0.0075	0.0095	0.0053
Intake-2	0.0048	0.0192	0.0085	0.0092	0.0078	0.0099	0.0055
Intake-3	0.0091	0.0237	0.0254	0.0114	0.0153	0.0170	0.0073

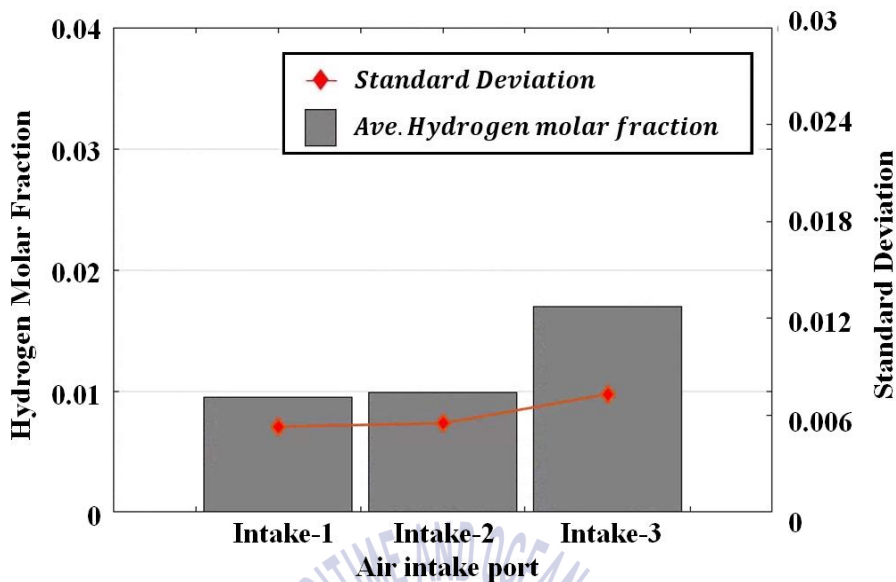


Fig. 44 급기구 높이에 따른 평균 수소몰분율과 표준편차

Fig. 44는 Table 17의 데이터를 바탕으로 정상상태에서 누출수소의 평균 몰분율과 그 표준편차를 함께 나타낸 것이다. Intake-1의 조건에서 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 몰분율이 가장 낮게 나타나며 Intake-3의 조건에서는 Intake-1보다 약 80% 정도 수소의 몰분율이 높게 나타난다. 그 이유는 일반적으로 누출수소가 유입기류의 흐름에 따라 신속하게 배기구로 배출되는 것이 효율적인데, 천장면에 위치한 배기구의 영향으로 유입공기는 상부로 이동하게 되고 따라서 급기구의 높이가 높아질수록 급기구를 기준으로 그 하부공간에는 상대적으로 약한 유동장이 형성되어 수소가스가 신속하게 배출되지 못하고 체류하는 시간이 길어지기 때문이다. Fig. 45는 탱크의 Bottom에서 수소가스가 누출할 때, 수소누출 영역의 수직단면에서 농도분포를 수소몰분율 0~0.04의 범위로 나타낸 것이다. Intake-1과 Intake-2의 누출수소의 가연 범위는 큰 차이가 없으며 급기구를 통한 유입 공기의 영향으로 누출수소가 우측 벽면을 타고 이동하는 것이 확인된다. Intake-3의 조건에서는 누출수소가 좌측 벽면으로 확산되는 것이 보이는데, 그 이유는 급기구가 천장면에 위치한 배기구와 비정상적으로 가깝기 때문에 유입공기가 배기구로 곧바로 배출되면서 탱크를 중심으로 형성되는 기류의 방향이 Intake-1, 2와 비교하여 반시계방향에서 시계방향으로 바뀌었기 때문이다. 이는 저장실 내의 속도분포를 통해 확인 할 수 있다.

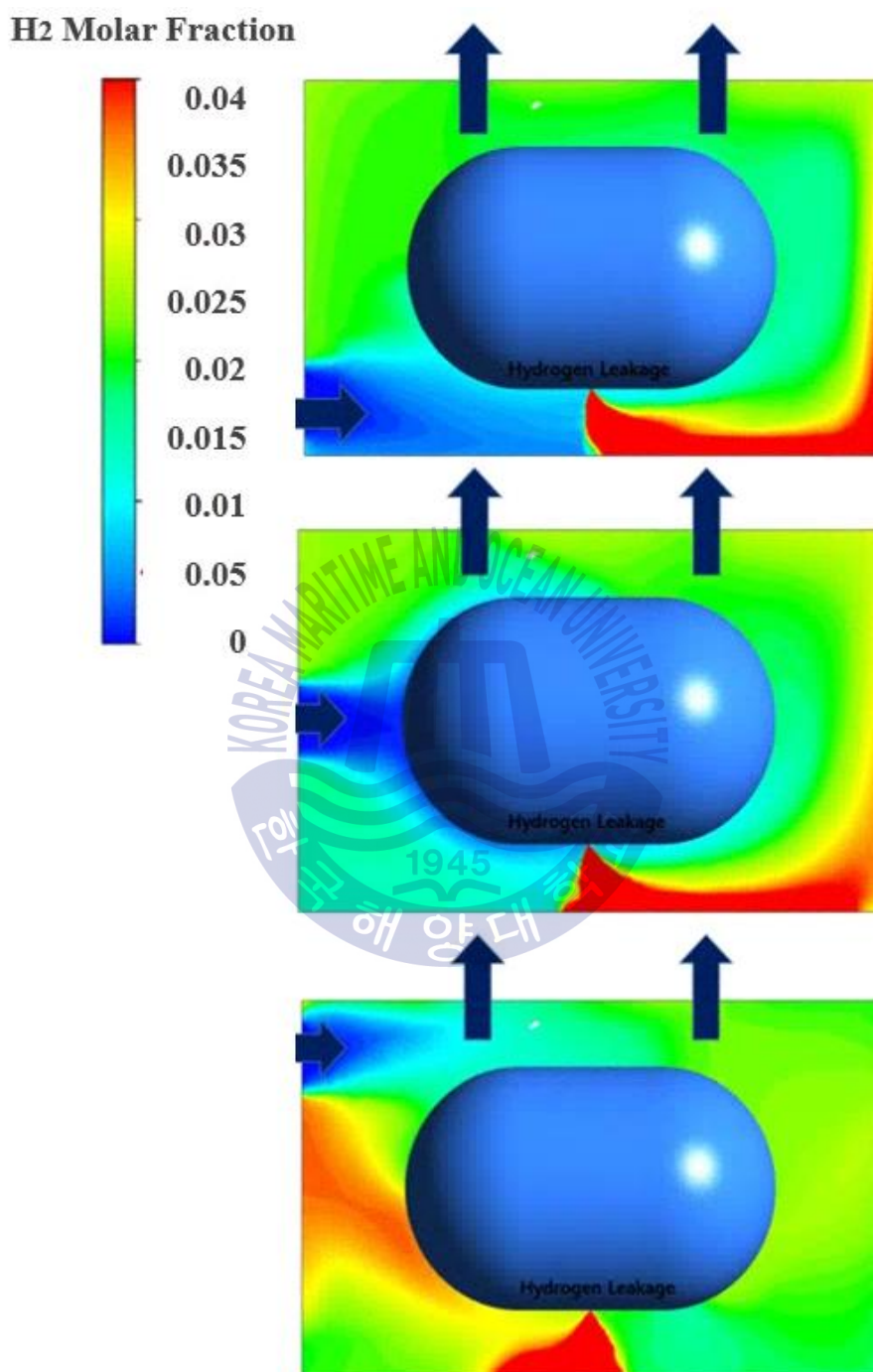


Fig. 45 급기구 높이에 따른 수직단면의 수소농도 분포

3.3.2. 급기구 높이에 따른 압력분포

Fig. 46은 탱크의 Bottom에서 수소가스가 누출할 때, 급기구 수직단면의 속도분포를 나타내며 가장 큰 차이점은 Intake-3의 조건에서 기류가 탱크를 중심으로 시계방향으로 형성되는 점으로 Intake-1, 2와 비교하면 반대방향인 것이다. 그 이유는 Intake-3의 조건에서 급기구를 통해 유입된 공기가 즉각적으로 배기구로 배출되고 그 일부가 우측벽면을 따라 탱크의 하부측으로 기류가 형성되기 때문이다. 또한 기류의 세기는 배기구와 급기구간의 짧은 거리에서만 강하게 형성되고, 그 공간을 제외한 영역에서는 Intake-1, 2와 비교해 상대적으로 약하게 형성된다. 이를 통해 Intake-3의 조건에서 누출된 수소가스가 신속하게 배기구가 위치한 상부로 확산하지 못할 것으로 판단된다.

Fig. 47은 급기구 높이 변화에 따른 급기구가 설치된 측벽의 압력분포를 $-1\sim 1$ Pa의 범위로 나타낸 것이다. 급기구의 설치 높이와 관계없이 공통적으로 보이는 특징은 상부로 올라갈수록 형성되는 압력이 낮아지는 것이다. 그 이유는 저장실 내에 형성되는 압력은 배기구의 흡입력에 기인한 것인데, 배기구가 천장면에 위치하기 때문에 상부측에는 흡입력의 영향을 크게 받아 부압이 형성되어 압력이 낮고 상대적으로 흡입력의 영향을 적게 받은 하부측은 압력이 높게 나타나는 것이다.

Intake-3의 조건에서는 저장실의 하부로부터 1/3의 지점까지는 양압이 형성되므로 누출에 따른 수소가스의 확산과 폭발을 고려하면 적절한 조건이라고 볼 수 없다. Fig. 48은 급기구 설치높이에 따른 저장실의 수평단면에서 평균압력을 그래프로 나타낸 것이다. Intake-1의 조건에서는 모든 높이에서 저장실 내에 음압이 형성되므로 한국선급에서 제시한 수소탱크 저장실 내의 부압형성 규정에 만족되지만 Intake-2, 3은 저장실 내의 하부공간에서 양압이 형성되므로 규정을 만족시키지 않는다. 이를 고려하여 급기구 설치 높이를 결정하고자 할 때에는 저장실 상부측에 설치되는 배재되어야 하는 것이 합당하다고 판단된다.

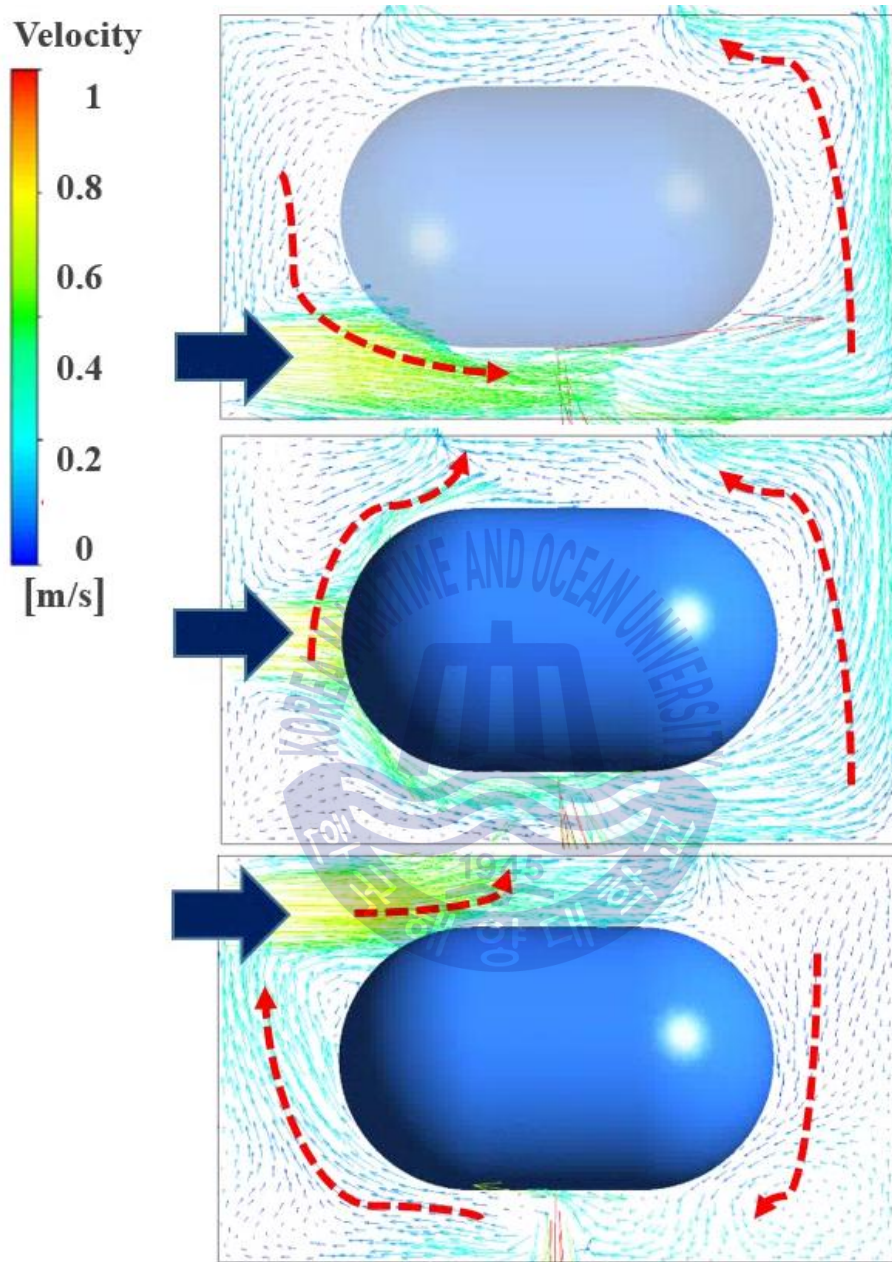


Fig. 46 급기구 높이에 따른 수직단면의 속도분포

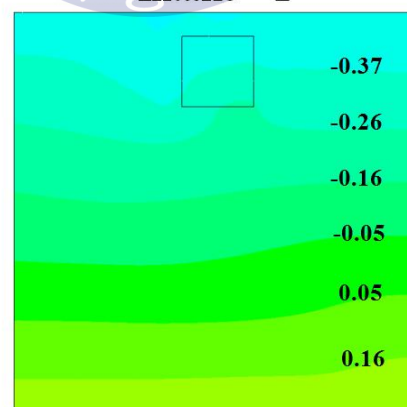
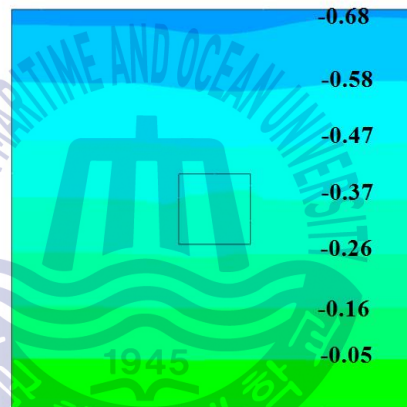
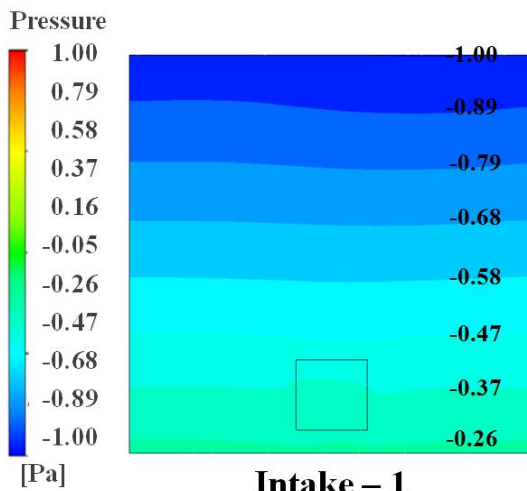


Fig. 47 급기구 높이에 따른 측벽의 압력분포

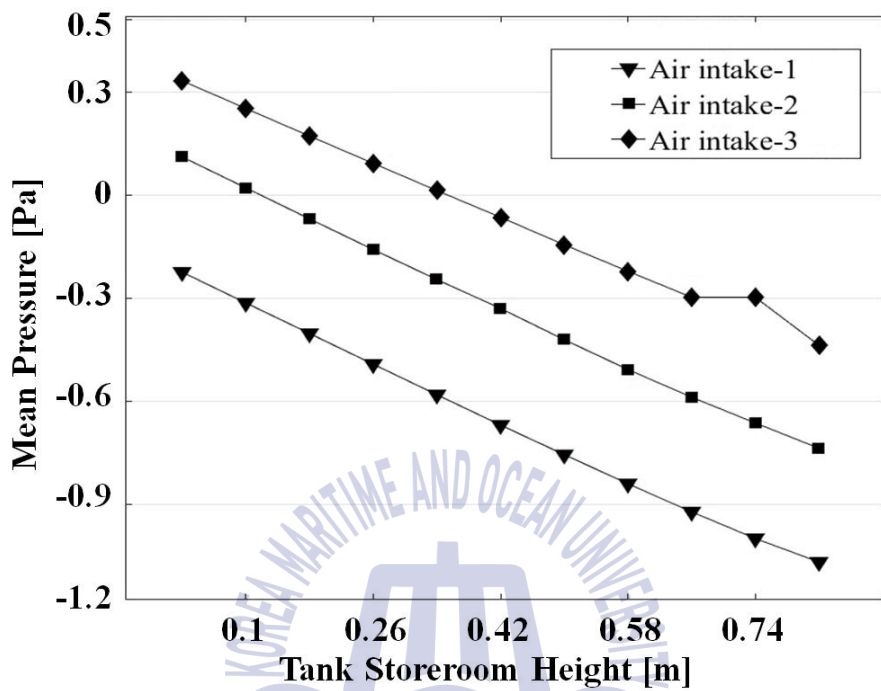


Fig. 48 급기구 높이에 따른 저장실 수평단면의 압력분포

3.3.3. 급기구 크기에 따른 수소농도

Fig. 49는 수소탱크 저장실 하부에 설치되는 급기구 크기 증가에 따른 배치를 나타낸 것이다. Intake-1의 조건에서 급기구 크기는 길이 0.15 m의 정사각형으로 그 면적이 0.0225m^2 이다. Intake-4에서는 3개의 구획을 하나의 급기구로 하여 면적이 0.0675m^2 이 되고 Intake-5에서 5개의 구획을 하나의 급기구로 하여 면적이 0.1125m^2 가 된다. 급기구의 크기가 증가함에 따라 수소탱크 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 물분율과 내부의 유동특성을 비교하였다.

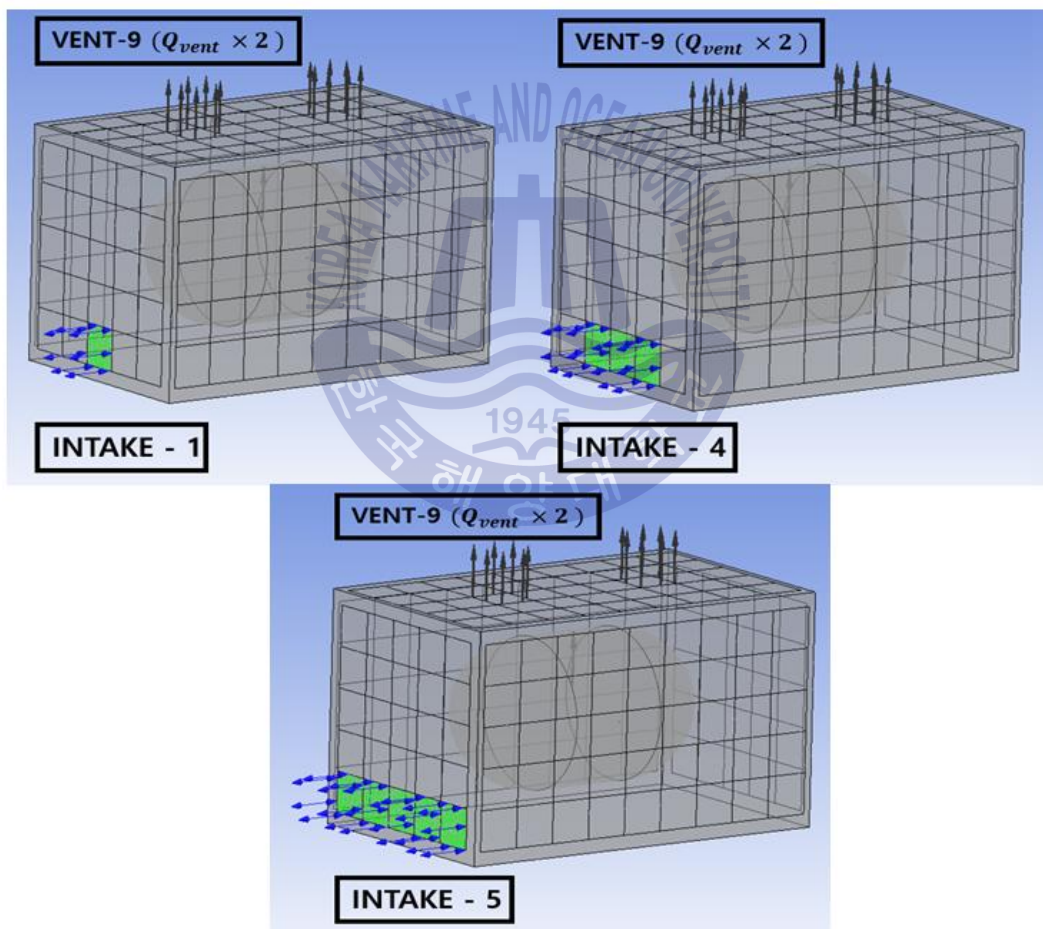


Fig. 49 급기구 크기 증가에 따른 배치

Table 18 Hydrogen molar fraction(Intake-1, 4, 5) according to leakage and ventilation position

Intake position	Hydrogen gas leakage point					Average	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear	Side		
Intake-1	0.0051	0.0186	0.0067	0.0098	0.0075	0.0095	0.0053
Intake-4	0.0045	0.0177	0.0062	0.0079	0.0058	0.0084	0.0053
Intake-5	0.0043	0.0169	0.0059	0.0076	0.0055	0.0080	0.0051

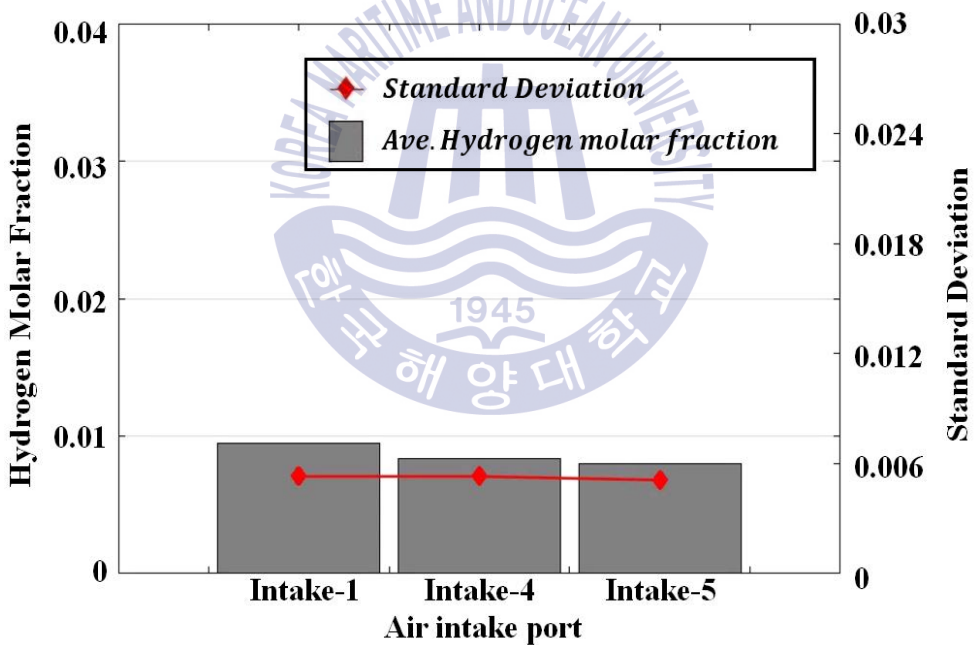


Fig. 50 급기구 크기에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차

Table 19 Average velocity(Intake-1~5) according to leakage point and ventilation position

Vent position	Hydrogen gas leakage point					Average [m/s]
	Top	Bottom	Front	Rear	Side	
Intake-1	0.121	0.135	0.138	0.133	0.127	0.131
Intake-2	0.085	0.139	0.076	0.104	0.095	0.099
Intake-3	0.078	0.159	0.125	0.114	0.094	0.114
Intake-4	0.081	0.101	0.091	0.090	0.081	0.088
Intake-5	0.055	0.085	0.061	0.074	0.061	0.067

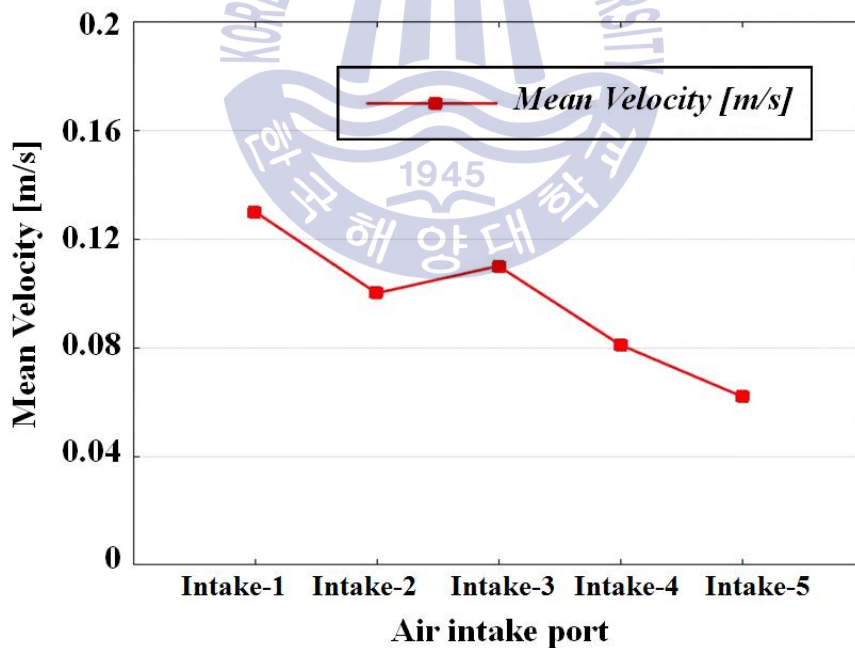


Fig. 51 급기구 높이와 크기에 따른 저장실 내의 평균속도

Fig. 50은 Table 18의 데이터를 바탕으로 급기구 크기 증가에 따른 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균물분율과 그 표준편차를 함께 나타낸 것이다. 급기구의 면적이 가장 큰 Intake-5의 조건에서 가장 적은 평균물분율을 나타내고 있지만 급기구 높이에 따른 결과와 비교할 때 그 차이는 미미하다.

Table 19는 저장실 내부에 형성되는 기류의 평균속도를 나타내며 Fig. 51은 이 데이터를 바탕으로 급기구 높이와 크기에 따른 평균속도를 비교한 것이다. Intake-1, 2, 3은 급기구 높이 증가에 따른 조건이며 Intake-1, 4, 5는 급기구 크기 증가에 따른 조건이다. 급기구 크기 증가에 따른 평균속도 감소폭이 급기구 높이 증가에 따른 감소폭 보다 크게 나타난다. 그 이유는 같은 통풍용량에서 급기구의 크기가 증가함에 따라 유입되는 공기의 속도가 현저하게 감소하기 때문이다. 이것은 급기구 영역의 수평 단면적과 배기구 영역의 수평단면적의 속도분포를 0~1 m/s의 범위로 나타낸 Fig. 52를 통해 확인할 수 있다. 구체적으로 급기구 크기에 따른 저장실 내의 속도분포를 살펴보면 Fig. 53과 같이 나타난다. 공통적으로 보이는 특징은 좁은 급기구를 통해 유입되는 공기의 속도가 높고 이후 높이가 증가할수록 기류의 속도가 감소하다가 배기구 영역에서 다시 단면적이 감소하면서 배출되는 기류 속도가 급격하게 증가하는 것이다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 54와 같다. Intake-5의 조건에서는 저장실 내에 급기구와 배기구 영역을 제외하고는 높이에 따른 평균속도의 차이가 거의 없다. 이것은 저장실 내의 형성되는 기류의 세기가 상대적으로 약하다는 것을 나타내며 누출수소의 신속한 배출 측면에서 불리하다고 판단된다. Fig. 55는 탱크의 Bottom 위치에서 수소가스가 누출할 경우, 저장실의 상부에서 아랫방향으로 내려다보는 시각에서 탱크저장실 바닥 면의 수소가스 농도분포를 수소물분율 0~0.04의 범위로 나타낸 것이다. 수소가스의 폭발범위가 4~76 vol%임을 감안하면 급기구의 크기가 큰 Intake-4, 5의 조건에서 Intake-1에 비해 수소가스의 가연범위가 누출위치와 가깝고 넓게 분포함을 알 수 있다. 이를 통해서 급기구 크기가 큰 Intake-4, 5의 조건이 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 농도를 다소 감소시킨다 할지라도 폭발의 위험성을 고려하면 불리한 조건이라고 생각된다.

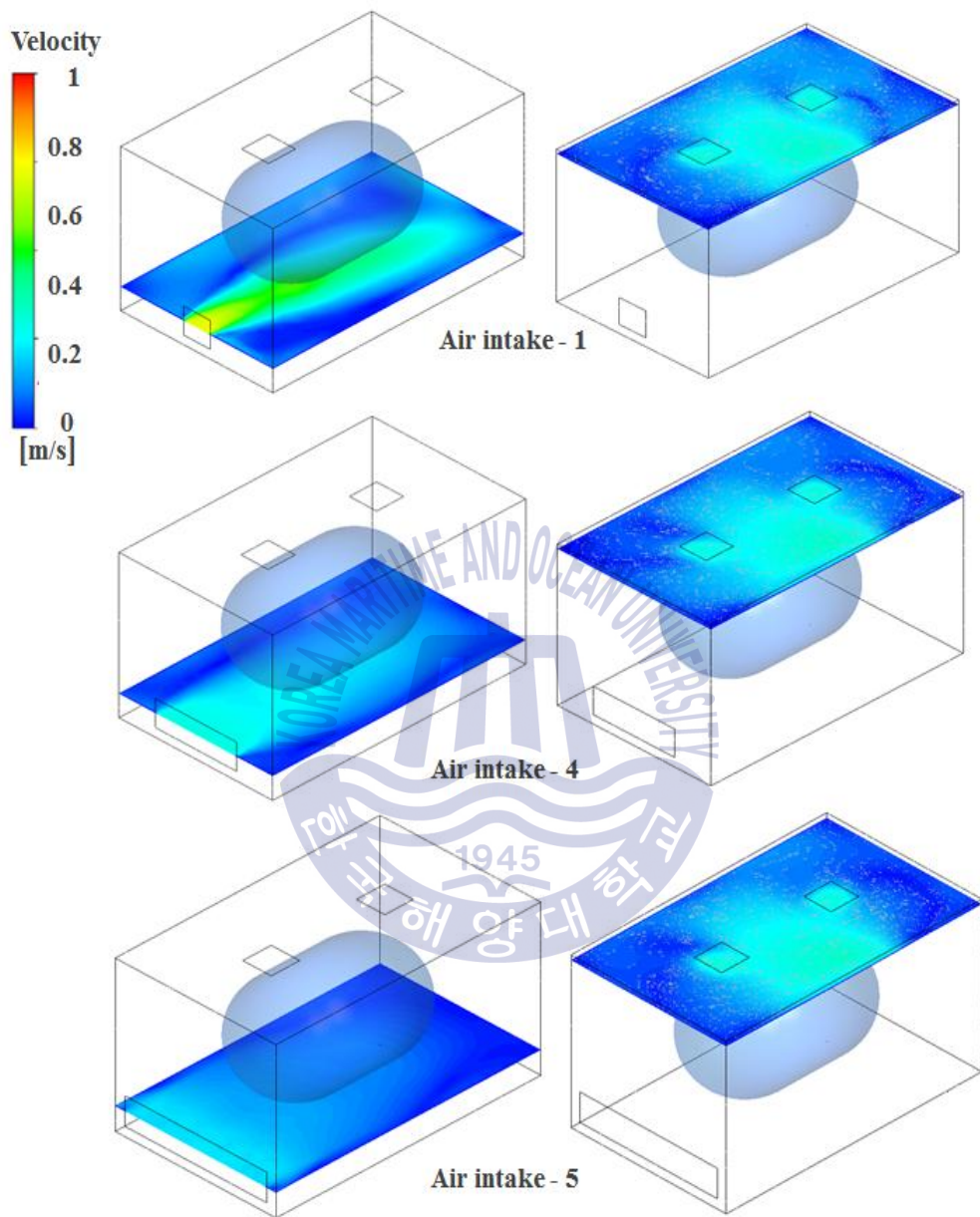


Fig. 52 급기구 크기에 따른 수평단면의 속도분포

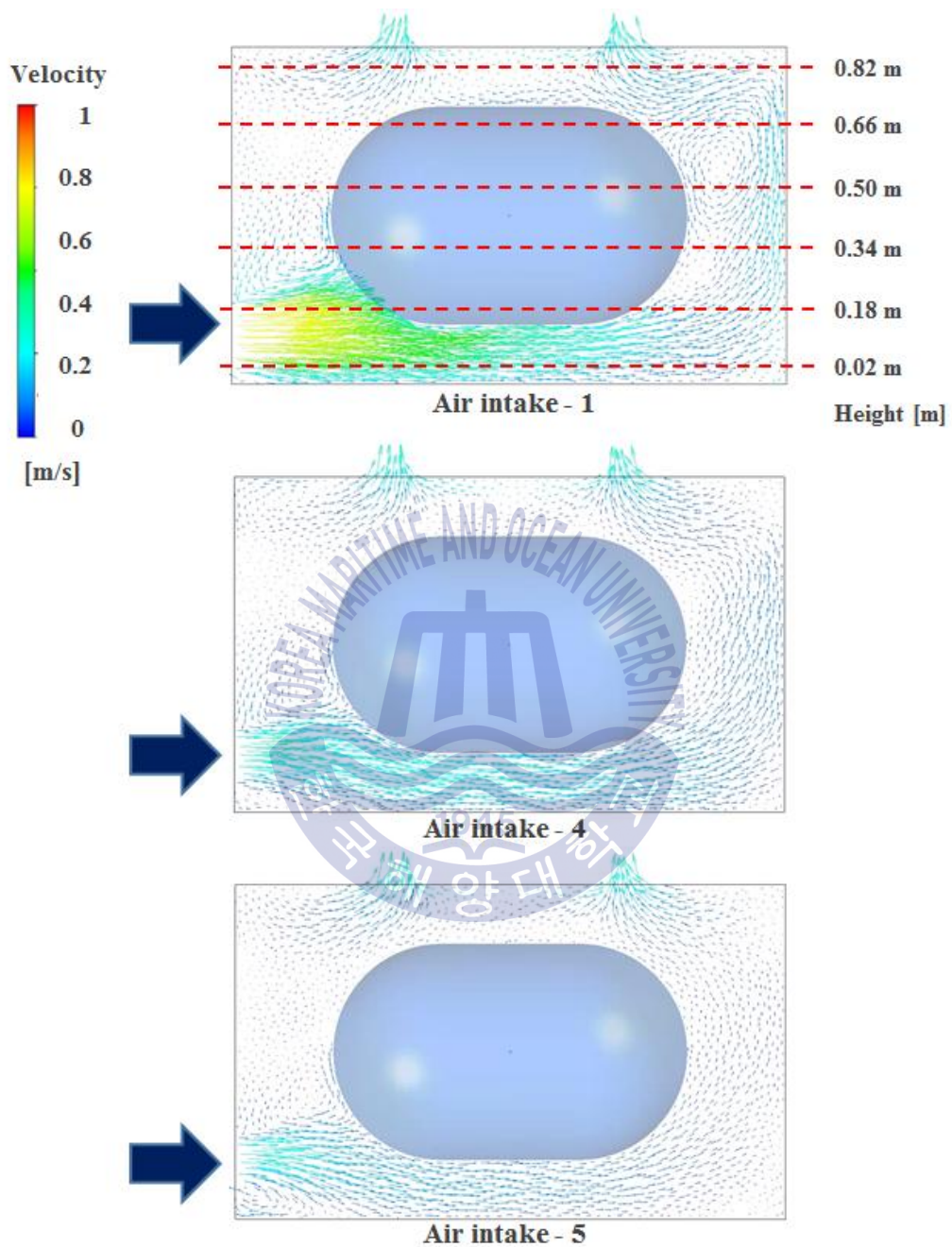


Fig. 53 급기구 크기에 따른 수직단면의 속도분포

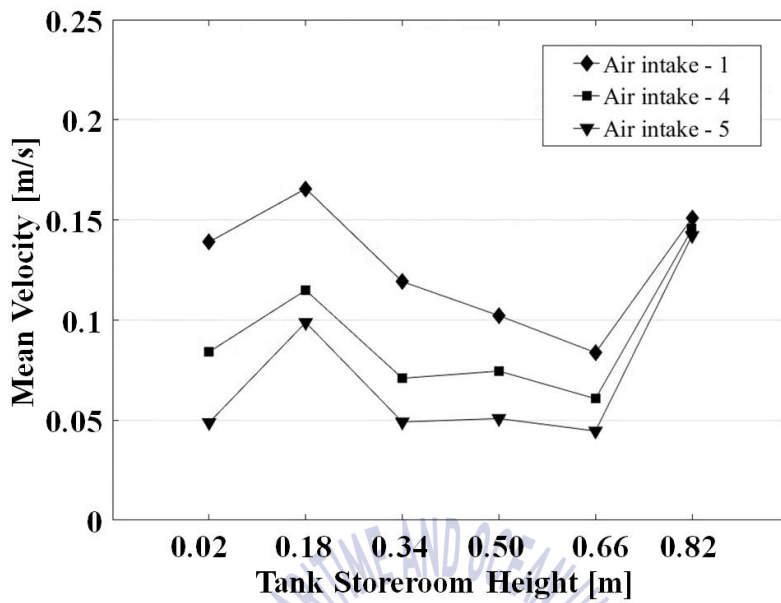


Fig. 54 급기구 크기변화에서 저장실 내 높이에 따른 속도분포

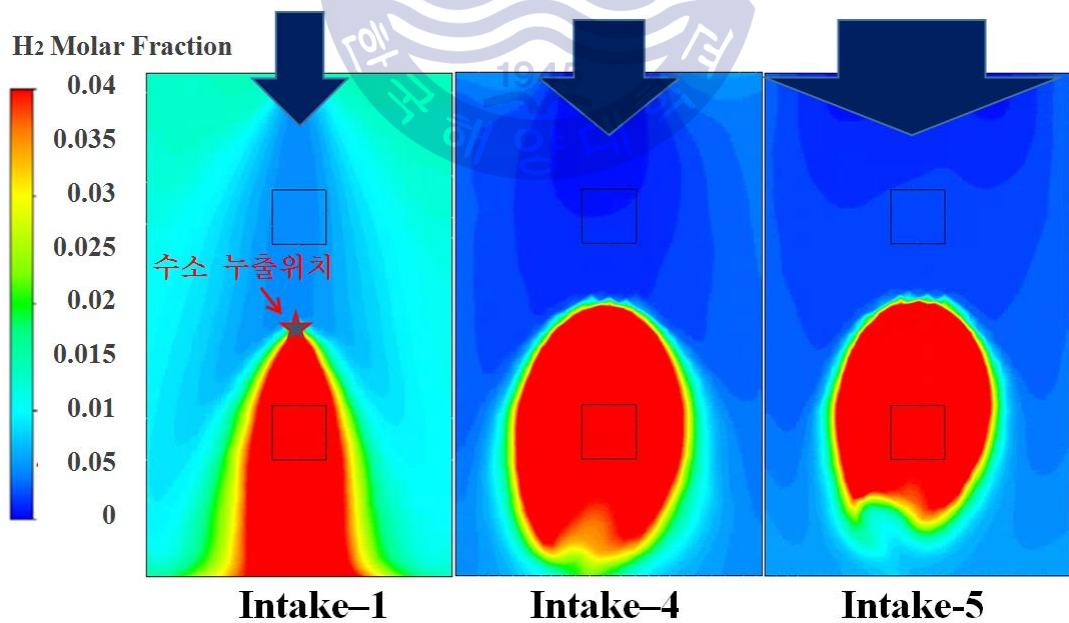


Fig. 55 급기구 크기에 따른 바닥면의 수소 가연영역 분포

3.3.4. 급기구 크기에 따른 압력분포

Fig. 57은 급기구 크기에 따른 급기구가 위치한 측벽의 압력분포를 -1~1 Pa의 범위로 나타낸 것이다. 급기구의 크기가 증가할수록 전체적으로 높은 평균압력이 형성되며 Intake-4, 5의 조건에서는 하부측의 일부 영역에서 양압이 형성됨을 알 수 있다. 이는 누출수소의 확산과 폭발을 고려하면 적절한 급기구의 조건이라고 볼 수 없다. 구체적으로 Fig. 56은 각각의 급기구 조건에서 저장실내의 높이 변화에 따른 수평단면적의 압력분포를 표로 나타낸 것이다. 급기구의 크기가 Intake-1에서 Intake-4로 증가할 때와 Intake-1에서 Intake-5로 증가할 때를 비교하면 부압의 크기가 급기구 크기에 증가에 따라 선형적으로 감소하지 않는다. 일반적으로 급기구의 크기가 증가할수록 신선한 공기의 유입과 확산의 측면에서 유리하지만 저장실 내에 형성되는 부압의 크기를 고려한다면 급기구의 크기제한이 필요하다는 것을 알 수 있다.

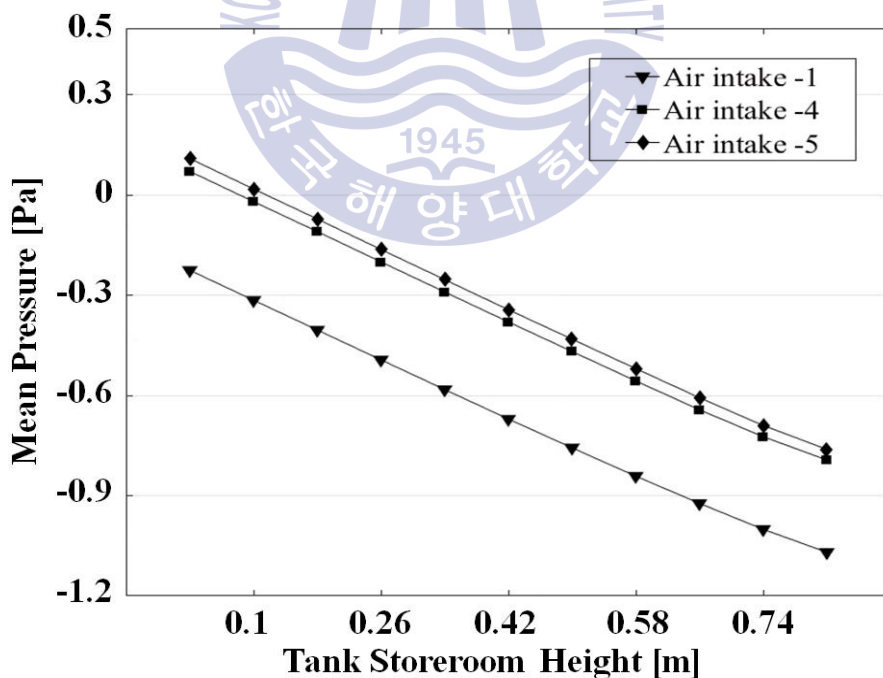


Fig. 56 급기구 크기에 따른 저장실 수평단면의 압력분포

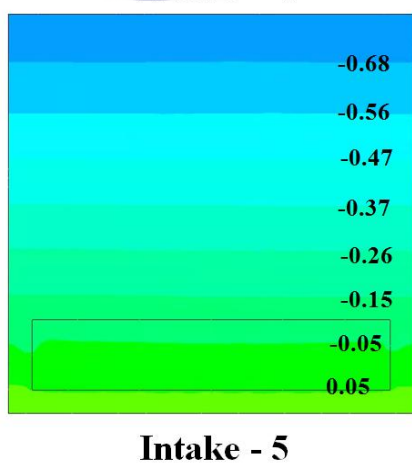
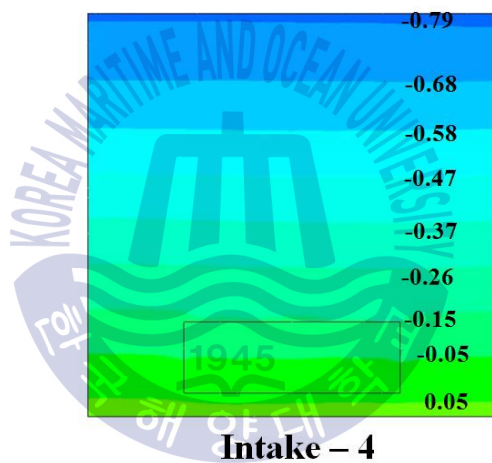
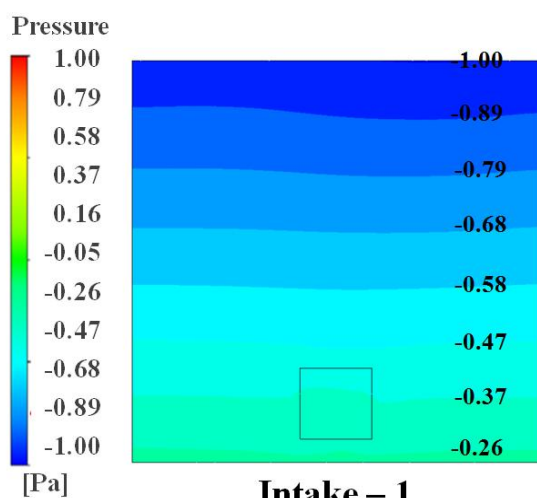


Fig. 57 급기구 크기에 따른 측벽의 압력분포

3.3.5. 급기구의 설치 측벽에 따른 수소농도

Fig. 58은 급기구의 설치 측벽에 따른 배치를 나타낸 것이다. Intake-1의 조건에서 급기구는 배기구와 같은 수직단면상에 위치하고 있지만 Intake-6은 배기구의 수직단면에서 90° 어긋나게 배치되어 있다. 계산 결과, Table 20과 같이 정상상태에서 Intake-6의 경우 잔존하는 누출수소의 농도가 다소 높게 나타났다. Fig. 59는 정상상태에서 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 물분율과 그 표준편차를 함께 나타낸 것이다.

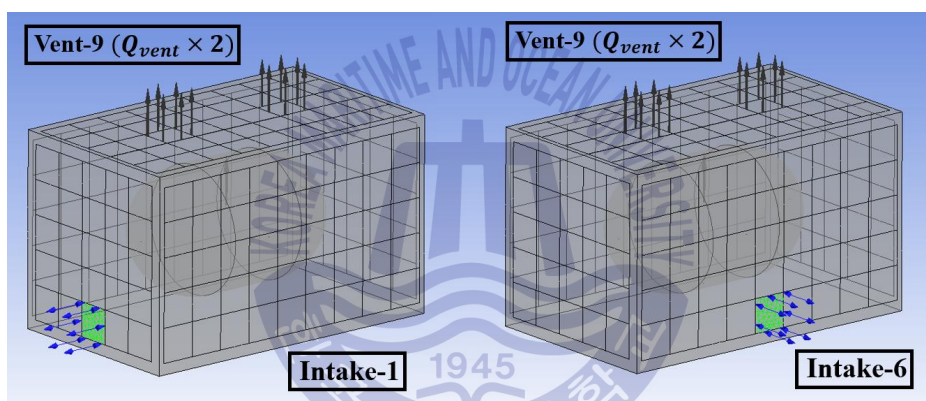


Fig. 58 급기구 설치 측벽에 따른 배치

Table 20 Hydrogen molar fraction(Intake-1, 6) according to leakage and ventilation position

Intake position	Hydrogen gas leakage point					Average	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear	Side		
Intake-1	0.0051	0.0186	0.0067	0.0098	0.0075	0.0095	0.0053
Intake-6	0.0051	0.0208	0.0087	0.0089	0.0078	0.0103	0.0061

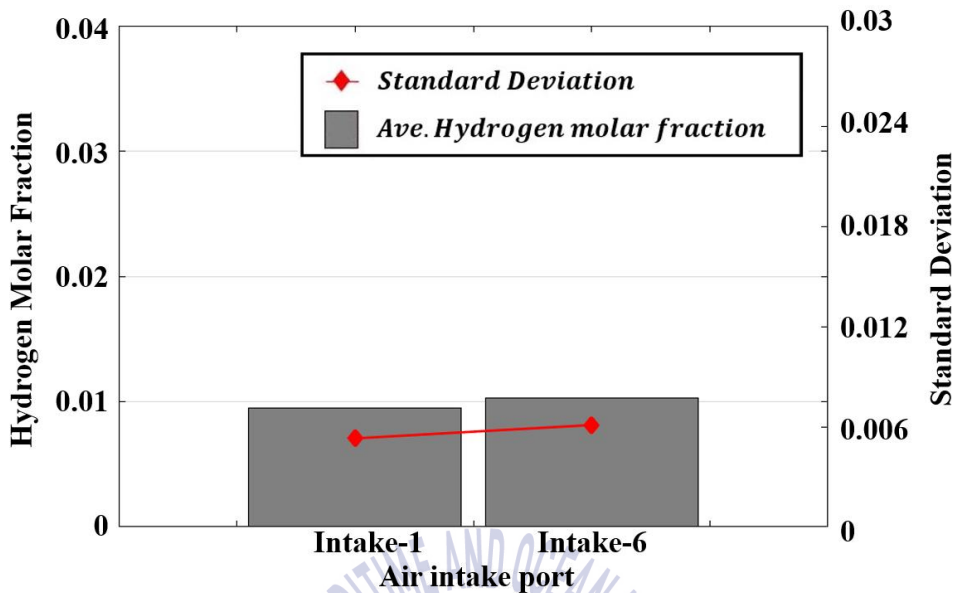


Fig. 59 급기구 설치 측벽에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차

Fig. 60은 탱크의 Bottom 위치에서 수소가스가 누출 할 경우에 누출 영역으로부터 배기구로 배출되는 누출수소의 유선을 나타낸 것이다. Intake-1의 조건에서는 급기구와 배기구가 같은 수직 평면상에 위치해 있기 때문에 누출수소는 급기구를 통해 유입된 기류의 영향을 받아 벽면을 타고 단순한 궤적을 그리며 배기구로 배출되게 된다. Intake-6에서도 벽면을 타고 누출수소가 배출되는 흐름은 유사하지만 누출수소의 유선이 Intake-1에 비해 상대적으로 다소 넓게 분포되는 것이 보인다. 이를 통해 Intake-6의 조건에서 잔존하는 누출수소의 농도가 다소 높게 나타난 이유가 급기구와 배기구의 배치조합이 수소의 확산거동에 영향을 미치기 때문이라는 것을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 대단히 작고 실제 수소탱크를 저장실 내에 배치할 때, 부가적으로 설치되는 장치를 고려한다면 유입기류의 충분한 순환에 장애가 적을 곳을 급기구의 위치로 선정하는 것이 더 합리적이라고 생각된다.

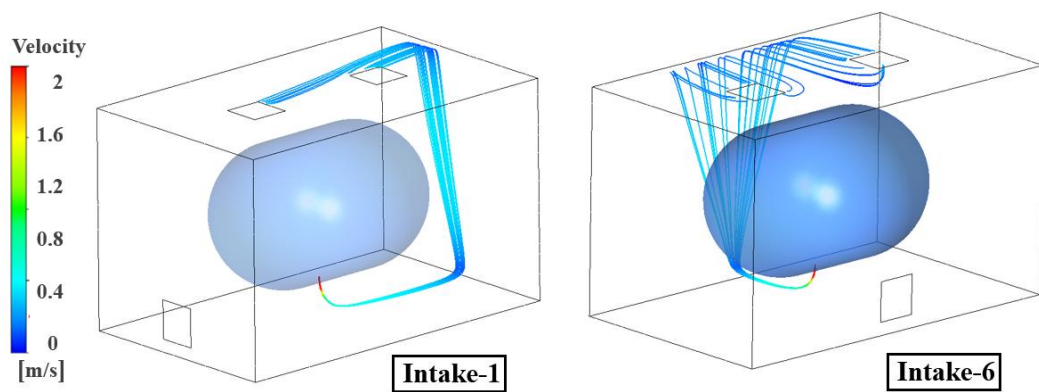


Fig. 60 급기구 설치 측벽에 따른 누출수소의 유선도



3.4 수소탱크 저장실의 기울기에 따른 결과

소형선박에 설치되는 수소탱크 저장실을 고려할 때, 운항 중에 선체의 기울임이 발생한다. 이것은 항해 중의 유속과 선박의 종방향 위치에 따른 수압의 차이로 나타나는데, 본 연구에서는 이 사실을 바탕으로 소형선박 내에 설치되는 수소탱크 저장실의 기울임이 Gradient 0° , 1° , 2° , 3° , 5° 로 급기구가 위치한 영역이 아래로 기울었을 때는 가정하여 Fig. 61과 같이 계산을 진행 하였다.

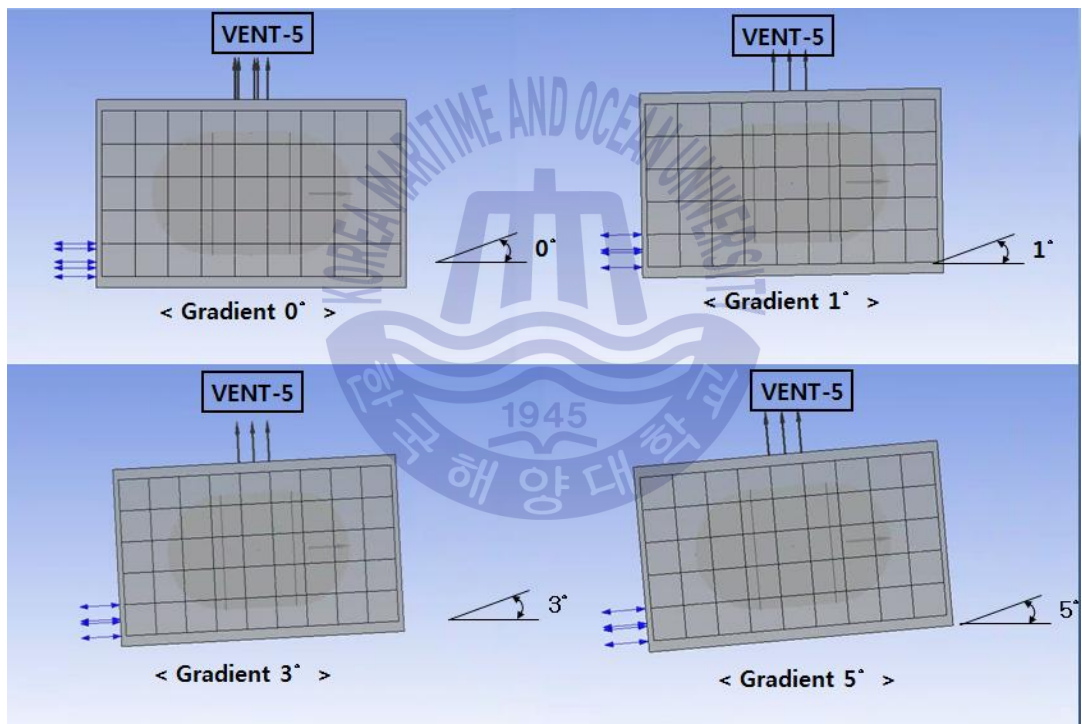


Fig. 61 수소탱크 저장실의 기울기에 따른 배치

Table 21 Hydrogen molar fraction(Gradient-0°~5°) according to leakage and ventilation position

Vent position	Hydrogen gas leakage point					Average	Standard deviation
	Top	Bottom	Front	Rear	Side		
Gradient 0°		0.0189	0.0092	0.0107	0.0109	0.0118	0.0040
Gradient 1°		0.0188	0.0073	0.0106	0.0065	0.0108	0.0057
Gradient 3°		0.0187	0.0072	0.0102	0.0068	0.0107	0.0055
Gradient 5°		0.0186	0.0071	0.0098	0.0067	0.0105	0.0055

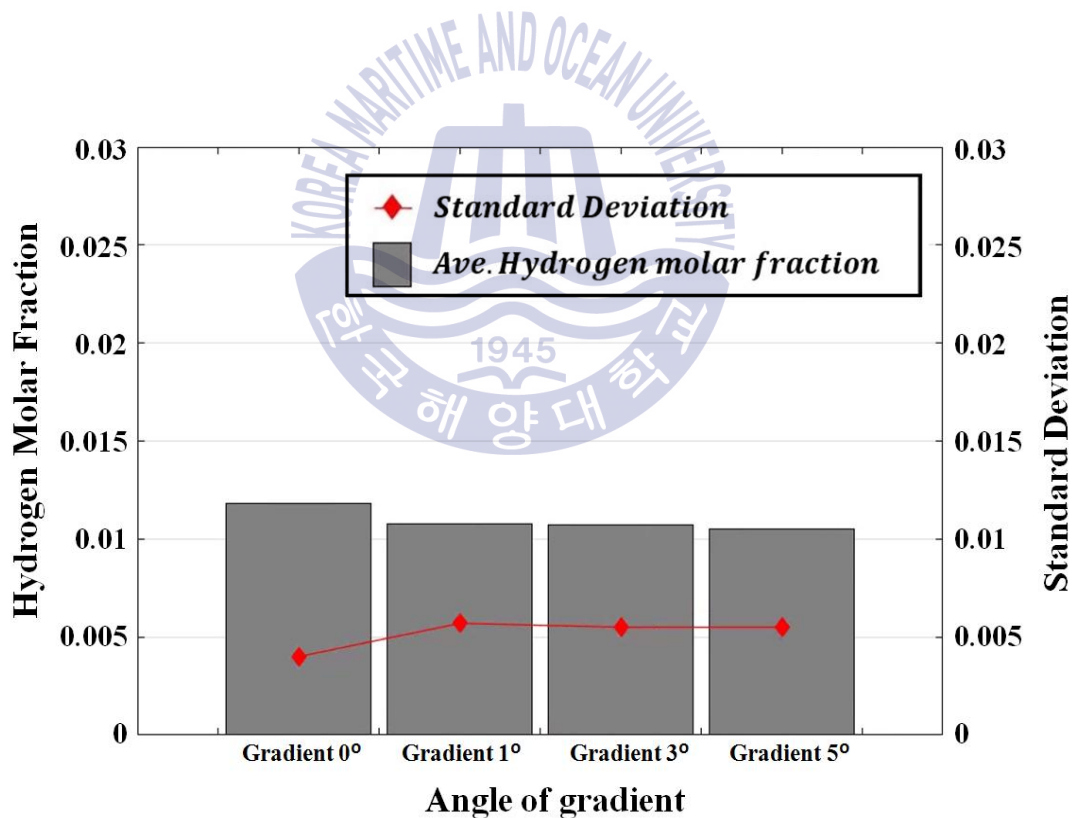


Fig. 62 수소탱크 저장실 기울기에 따른 수소 평균몰분율과 표준편차

Fig. 62는 Table 21의 데이터를 바탕으로 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 평균몰분율과 그 표준편차를 함께 나타낸 것이다. 기울임이 증가할수록 저장실 내에 잔존하는 누출수소의 몰분율이 감소하며 이것은 정량적으로 그 차이는 미미하지만 저장실의 기울기가 분명히 누출수소의 배출에 영향을 미치는 것을 의미한다. 구체적으로 Fig. 63은 탱크의 Top 위치에서 누출수소가 발생할 경우, 시간경과에 따른 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 몰분율을 나타낸 것인데 수소탱크 저장실의 기울기가 없을 때보다 5°의 기울기에서 약 25 %정도 수소농도가 감소되는 것이 확인된다. 이는 수소의 가벼운 밀도로 인해 수소탱크 저장실의 기울기가 증가하면 천장면을 따라 배기구로 더 쉽게 수소가스가 이동하기 때문이다. Fig. 64는 탱크의 Top 위치에서 누출수소가 발생할 경우의 Gradient 1° ~ Gradient 5°에서 수소누출 영역의 수직단면의 수소 몰분율을 0~0.04의 범위로 나타낸 것이다. 수소탱크 저장실의 기울기가 증가함에 따라 저장실의 좌측상부의 집적되는 수소의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다.

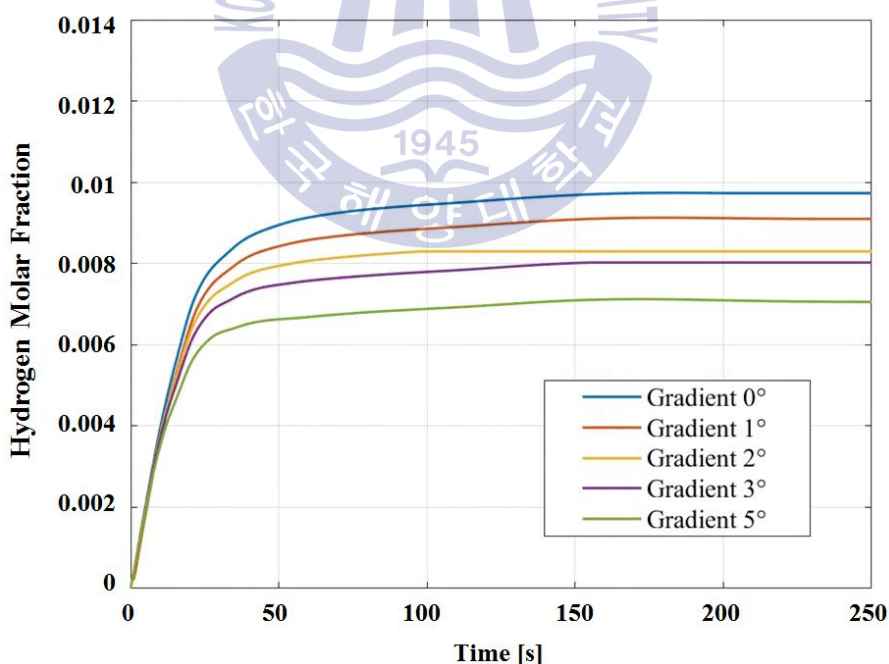


Fig. 63 탱크 Top 누출 조건에서 시간 경과에 따른 저장실 내 수소의 평균몰분율

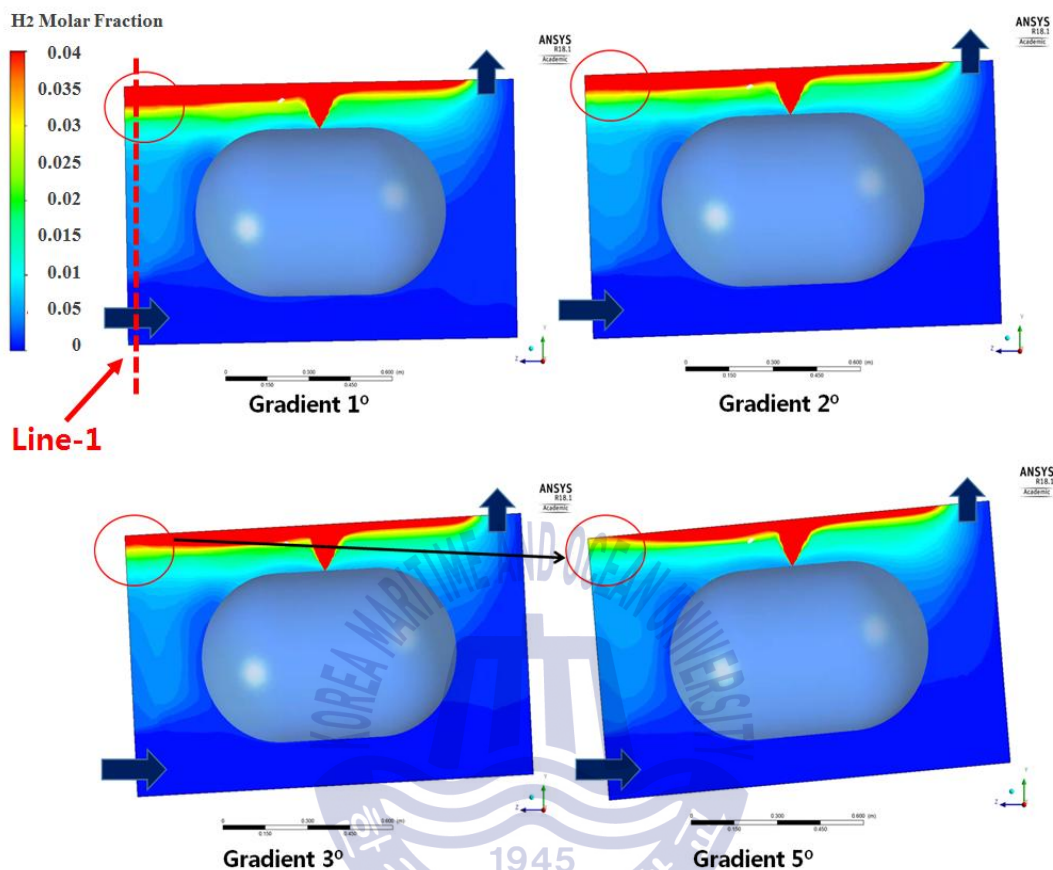


Fig. 64 수소탱크 저장실 기울기에 따른 수직단면의 수소농도 분포

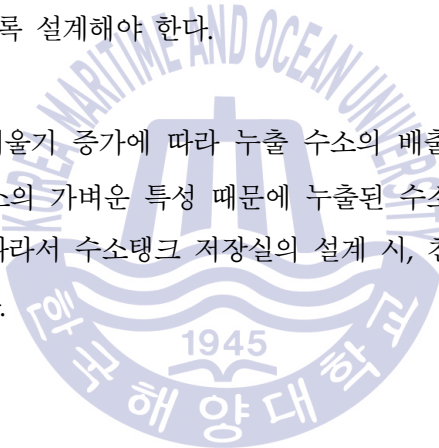
Fig. 65는 Fig. 64에 표시된 Line-1, 즉 수소탱크 저장실 급기구 영역에서 높이에 따른 잔존하는 누출수소의 물분율을 표로 나타낸 것이다. 급기구가 위치한 높이 약 0.2 m까지는 유입되는 공기로 인해 누출수소가 거의 분포하지 않고 가벼운 수소는 상부부터 집적되기 때문에 높이가 올라갈수록 수소농도가 증가한다. 높이 0.56 m까지는 큰 차이가 없지만 그 이상에서는 기울기가 큰 Gradient 5°에서 누출수소 물분율이 50 %이상 감소하는 것이 확인된다. 이것으로 탱크저장실의 설치에서 기울기를 고려할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 혹은 탱크저장실의 천장면이 평판이 아닌 경사를 주어 제작함으로써 누출수소 배출을 고려한 효과적인 설계가 될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 ANSYS CFX(v. 17.1)을 이용하여 수소탱크 저장실 내의 수소누출을 고려한 유동해석을 3차원 전산해석으로 진행하였다. 제작된 모델링을 통해 134 m/s의 속도로 누출되는 수소가스의 확산을 모사하였으며 한국선급에서 제공하는 “연료전지시스템지침(2015)”를 근거로 경계조건을 설정하였다. 수소탱크 저장실의 급기구와 배기구의 위치를 다양하게 변경하면서 저장실 내의 누출 수소가스의 거동과 유동특성을 확인하였다. 이를 통해 수소탱크 저장실의 통풍장치 설계 시, 적용해야 할 환기 조건을 확인하였으며 연구결과와 세부적인 내용은 아래와 같다.

- 통풍용량의 증가에 따라 저장실 내의 잔존하는 누출 수소의 농도는 크게 감소하나 그 관계가 선형적이지 않음을 확인하였다. 통풍용량의 증가는 소비전력과 관계되므로 이를 고려하여 적절한 통풍용량을 결정해야 한다.
- 배기구의 위치가 높아질수록 저장실 내 잔존하는 누출 수소의 농도와 누출위치에 따른 표준편차도 크게 감소하는 것을 확인하였다. 이것은 수소가스의 가벼운 특성 때문이며 누출 수소는 상부 공간부터 집적되어 배기구로 배출되기 때문에 이를 고려하여 배기구 위치를 선정해야 한다.
- 저장실 내에 비교적 큰 수소탱크가 배치되어 있고 밀도가 낮은 수소가스 누출이 있는 본 해석대상에서는 급기구와 같은 측벽에 위치한 배기구의 조건에서 급기구와 반대편 측벽에 위치한 배기구보다 누출 수소의 배출이 더 원활한 것을 확인하였다.
- 멀티 배기구의 경우 싱글 배기구보다 누출 수소의 배출 효과가 좋으나 그 차이는 배기구 높이에 따른 결과와 비교할 때 별로 크지 않다.

- 급기구의 높이가 높아질수록 저장실 내의 누출 수소의 평균농도는 증가하며 이것은 천장면에 설치되는 배기구의 영향으로 유입기류가 상부 방향으로 형성되어 급기구를 기준으로 그 하부공간에는 상대적으로 약한 기류로 인해 누출 수소를 효과적으로 배출시키지 못하기 때문이다. 또한, 급기구 높이 증가에 따라 저장실 내에 형성되는 부압의 크기도 감소한다.
- 급기구의 크기가 증가할수록 누출 수소가스의 배출 성능은 향상되나 저장실 내 기류의 평균속도는 줄어들고 저장실의 하부공간에서 양압이 형성된다. 이것은 규정에 명시된 저장실 내의 부압유지의 기능을 상실하므로 누출 수소가스의 확산 위험이 있다. 따라서 급기구의 크기를 결정할 때, 내부의 형성되는 압력을 고려하여 일정 부압이 유지하도록 설계해야 한다.
- 수소탱크 저장실의 기울기 증가에 따라 누출 수소의 배출 성능이 향상하는 것으로 확인된다. 이것은 수소의 가벼운 특성 때문에 누출된 수소가 천장면의 경사를 따라 배출되기 때문이다. 따라서 수소탱크 저장실의 설계 시, 천장면에 경사를 주는 것을 검토해볼 필요가 있다.



참고문헌

- [1] 정노택, 2011, IMO선박 기인 CO2 배출 규제 동향 및 고찰. *한국해양환경공학회지*. 14(1), pp.65-71.
- [2] 동아사이언스 Green Business 웹진, 2016, 미래 친환경 선박 꿈꾸는 요람에 가다 [Online] (Updated December 2015) Available at: <http://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=gtckrekr&logNo=220617343086&parentCategoryNo=&categoryNo=6&viewDate=&isShowPopularPosts=true&from=search> [Accessed 20 September 2017].
- [3] 위키백과, 2017, 수소 [Online] (Updated 29 August 2017) Available at: https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%88%98%EC%86%8C#.EC.99.B8.EB.B6.80_.EB.A7.81_.ED.81.AC [Accessed 08 September 2017].
- [4] Bain A, & Van Vorst W.D., 1999. The Hindenburg tragedy revisited: the fatal flaw found. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(5), pp.399-403.
- [5] 한국가스안전공사 “응답하라 가스안전” 웹진, 2014, 쉽게 폭발 할 수 있는 수소가스 사고사례로 본 수소가스의 위험 [Online] (Updated March 2014) Available at: http://blog.naver.com/kgs_safety/10188514123 [Accessed 28 September 2017].
- [6] 김명환, 2007, 선박 동력발생용 연료전지시스템 기술개발의 전망에 대한 고찰. *한국마린엔지니어링학회지*. 31(8), pp.924-931.
- [7] James Larminir & Andrew Dicks., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*. Translated by 박한웅, 도서출판 아진
- [8] 한국 선급 홈페이지, 선박용 연료전지 시스템 지침 [Online] (Updated 1 April 2015) Available at: <http://www.krs.co.kr/KRRules/KRRules2016> [Accessed 11 November 2016].
- [9] 연합뉴스, 2005. 수소저장용 초경량 고압용기 개발 [Online] (Updated 1 November 2005) Available at: <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=105&oid=001&aid=0001137445> [Accessed 11 May 2017].
- [10] ILJIN Composites. Type of hydrogen high pressure tank. Technical data of product [Image online] Available through: ILJIN Composites company website

<<http://www.composite.co.kr>> [Accessed 30. November. 2016]

- [11] Christopher J. Roy, 2004. Review of code and solution verification procedures for computational simulation. *Journal of Computational Physics*, 205(1), pp.131-156.
- [12] Paillere. H., Studer. E., Beccantini. A., Kudriakov. S., Dabbene. F., & Perret. C., 2005, Modelling of H₂ Deispersion and Combustion Phenomena Using CFD Codes. *Hysafe ICHS(International Conference on Hydrogen Safety)*
- [13] Prankul. Middha, Olav R. Hansen, & Idar E. Storvik., 2009, Validation of CFD-model for hydrogen dispersion, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(2009), pp.1034-1038
- [14] Schmidt, D., Krause, U., & Schmidtchen. U., Numerical simulation of hydrogen gas releases between buildings, *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(1999), pp.479-488.
- [15] Pitts. William M., Yang. Jiann C., Blais. Matthew., Joyce. Alexandra., Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2012), pp.17457-17469.
- [16] Matsuura. K., Kanayama. K., Tsukikawa. H., & Inoue. M., Numerical simulation of leaking hydrogen dispersion behavior in a partially open space. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2008), pp.240-247.
- [17] He. Jiaqing., Kokgil. Erdem., Wang(Leon). Liangzhu., & Hoi Dick Ng., Assessment of similarity relations using helium for prediction of hydrogen dispersion and safety in an enclosure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2016), pp.15388-15398.
- [18] Jose Antonio Salva., Elvira Tapia., Alfredo Iranzo., Francisco Javier Pino., Juan Cabrera., & Felipe Rosa., 2012, Safety study of a hydrogen leak in a fuel cell vehicle using computational fluid dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2012), pp.5299-5306.
- [19] Barral K. & Barthelemy H. 2006. Hydrogen high pressure storages, overview and new trends due to H₂ energy specifications and constraints. In: 16th World Hydrogen Energy Conference, Lyon, France.

- [20] Juan Pedro Berro. Ramirez., Damien Halm., Jean-Claude. Grandidier. ,Stephane. Villalonga., & Fabien Nony., 2015, 700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst e Simulation and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(2015), pp.13183-13192.
- [21] Kink. R.G., & Guo. Z., 2004, Influence of leak path friction on labyrinth seals inlet swirl. *Tribology Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, 52(2004), pp. 139-145
- [22] Han. Sang Heon., Chang. Daejun., & Kim. Jong Soo, 2014, Experimental investigation of highly pressurized hydrogen release through a small hole, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2014), pp.9552-9561.
- [23] Houf. W.G., & Schefer. R.W., 2007, Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2008), pp.1435-1444.
- [24] Houf. W.G., Schefer. R.W., & Williams. T.C., 2007, Investigation of small-scale unintended release of hydrogen: momentum-dominated regime. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2008), pp.6373-6384.
- [25] Hibbeler. R. C., 2015. *FLUID MECHANICS 1st Edition*, Translated from English by Kim. K.C., Press: SIGMA PRESS, pp.433-434
- [26] Cengel. Yunus. A., Cimbala. John. M., & Turner Robert. H., 2011 *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, Fouth Edition in Si Units*. Translated from English by Bae. D.S., Press: Mc Graw Hill Education, pp.326-327
- [27] 이용갑, 육진환, 강민호, 2004. [특집] CFX의 Pressure-Based Coupled와 다양한 난류 모델을 이용한 유체기계의 운동해석. 한국유체기계학회 논문집, 7(5), pp. 82-90
- [28] Mohamed Gad-el-Hak., 1995, STOKES'S HYPOTHESIS FOR A NEWTON, ISOTROPIC FLUID. *Journal of Fluids Engineering*, 117(1), pp.3-5